SISTEMA MUNICIPAL DE PROTECCIÓN CIVIL TULUM

TULUM 2021 2024

Atlas de Riesgos del Municipio de Tulum

Quintana Roo 2023



Tulum, Quintana Roo a Junio de 2023

Página en blanco

Atlas de Riesgos
del municipio de Tulum
Quintana Roo
2023

Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo 2021 - 2024

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo
Secretaría de Extensión y Vinculación
Centro de Información Geográfica
Cuerpo Académico de Geografía y Geomática

H. Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo
2021 - 2024

Diego Castañon Trejo
Presidente Municipal

María Teresa Arana Sánchez
Síndico Municipal
Comisión de Hacienda, Patrimonio y Cuenta

David Manances Tah Balam
Primer Regidor
Comisión de Bienestar, Salud Pública y Asistencia Social

Beatriz Anahí Mendoza Samos
Segundo Regidor
Comisión de Turismo, Industria, Comercio y Asuntos Agropecuarios

Martín Dzib Chimal
Tercer Regidor
Comisión de Anticorrupción, Participación Ciudadana y Transporte

Fany Adriana Gallegos Sánchez
Cuarto Regidor
Comisión de Educación, Cultura, Deporte y Desarrollo Juvenil

Carlos Adolfo Coral Basulto
Quinto Regidor
Comisión de Obras y Servicios Públicos

Paulina Yadira Malpica Yáñez
Sexto Regidor
Comisión de Desarrollo Urbano, Ecología, Ambiente y Protección Animal

Víctor Mas Tah
Séptimo Regidor
Comisión de Espectáculos, Diversiones, Trabajo y Previsión Social

Eva Rosely Rocha Geded
Octavo Regidor
Comisión de Desarrollo Familiar, Grupos Vulnerables, para la Igualdad de Género y Asuntos Indígenas

Iván Alfredo Dzul Cabañas
Noveno Regidor
Comisión de Seguridad Pública, Policía Preventiva, Tránsito y Derechos Humanos

Este documento es de carácter público, no es patrocinado ni promovido por partido político alguno. Sus recursos provienen de los impuestos que pagan todos los contribuyentes.

Está prohibido el uso de este documento con fines políticos, electorales, de lucro y otros distintos a los establecidos, quien haga uso indebido deberá ser denunciado y sancionado de acuerdo con la ley aplicable y ante autoridad competente.

Atlas de Riesgos del municipio de Tulum Quintana Roo 2023

H. Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo 2021 - 2024

C. Diego Castañon Trejo
Presidente Municipal

Reconocimiento especial al C. Marciano Dzul Caamal(†) por dar inicio a este Atlas.

Comisión técnica por parte del Ayuntamiento de Tulum

Lic. Jéssica Jacqueline Martínez Barrios
Dirección General de Protección Civil y Bomberos

Arq. Libertad Vázquez Burgos
Dirección General de Ordenamiento Ambiental y Cambio Climático

Ing. Jesús Alberto Sandy Interián
Dirección General de Planeación Municipal

Elaborado por

Secretaría de Extensión y Vinculación Zona Sur
Centro de Información Geográfica

Comisión técnica por parte del Universidad de Quintana Roo

M. en P. Gerardo Daniel López Montejo
Responsable del Centro de Información Geográfica (CIG)

Dra. Maria Luisa Hernández Aguilar
Responsable del Área de Percepción Remota del CIG

C. Ramiro Javier Cabrera Guillermo
Analista del Centro de Información Geográfica

Tulum, Quintana Roo
Junio de 2023

Primera edición: Junio de 2023

Fotografía de portada: Vince Russell de Unplash

Diseño de portada: Gerardo Daniel López Montejo

Diseño cartográfico: María Luisa Hernández Aguilar

Cartografía digital: Randy Mauricio Martínez Torres

Edición de datos: Ramiro Javier Cabrera Guillermo

Esta publicación es propiedad del Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo.

Los derechos de propiedad intelectual sobre los contenidos son del dominio de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo y los autores del mismo.

© Ayuntamiento de Tulum 2021-2024, 2023
© Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, 2023

CONTENIDO

1. Introducción 2

2. Antecedentes.....3

3. Objetivo 6

4. FASE 1 MARCO TEÓRICO 6

4.1. Determinación de los niveles de análisis y escalas de representación cartográfica.....6

4.2. Caracterización de los elementos del medio natural.....7

4.2.1. Fisiografía y geomorfología 7

4.2.2. Geología.....8

4.2.3. Edafología.....9

4.2.4. Hidrografía, cuencas y subcuencas.....10

4.2.5. Cuerpos de agua 11

4.2.6. Corrientes de agua. 11

4.2.7. Dolinas.....11

4.2.8. Clima.....12

4.2.9. Precipitación 13

4.2.10. Escenarios climáticos.....13

4.2.11. Áreas Naturales Protegidas 14

4.3. Caracterización de los elementos sociales, económicos y demográficos 15

4.3.1. Dinámica demográfica 15

4.3.2. Características sociales 19

4.3.3. Características de la vivienda 38

4.3.4. Empleo e ingresos 43

4.3.5. Equipamiento e infraestructura 47

4.3.6. Asentamientos irregulares 51

5. FASE II. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LOS PELIGROS ANTE FENÓMENOS PERTURBADORES DE ORIGEN NATURAL.....54

5.1. Fenómenos geológicos 54

5.1.1. Vulcanismo 55

CONTENIDO

5.1.2. Sismos 57

5.1.3. Tsunamis 61

5.1.4. Inestabilidad de laderas 74

5.1.5. Hundimientos 81

5.1.6. Subsidencias 86

5.1.7. Agrietamientos 91

5.2. Fenómenos astronómicos 93

5.3. Fenómenos hidrometeorológicos 98

5.3.1. Ondas cálidas y gélidas 98

5.3.2. Sequías 103

5.3.3. Heladas 113

5.3.4. Tormentas de granizo 113

5.3.5. Ciclones tropicales 116

5.3.6. Tormentas eléctricas 125

5.3.7. Tornados 131

5.3.8. Tormentas severas 137

5.3.9. Inundaciones por lluvias extremas 143

5.4. Fenómenos químicos tecnológicos 155

5.4.1. Almacenamiento de sustancias peligrosas 155

5.4.2. Incendios forestales 159

5.5. Fenómenos sanitario-ecológicos 163

5.5.1. Contaminación aire, suelos y agua 163

5.5.2. Epidemias y plagas 190

6. FASE III. VULNERABILIDAD 196

6.1. Vulnerabilidad social 196

6.1.1. Grado de vulnerabilidad social 196

7. FASE IV. RIESGO 248

7.1. El Riesgo y sus componentes 248

7.1.1. Los componentes del riesgo 248

7.2. Riesgo por ciclones tropicales 249

7.3. Riesgo por inundaciones 252

CONTENIDO

8. FASE V. PROPUESTA DE ESTUDIOS, OBRAS O ACCIONES.....256

8.1. Planteamiento de propuestas.....256

9. Referencias bibliográficas:.....265

Fase I

Marco Teórico



Fotografía de Vika Jordanov

1. Introducción

En materia de gestión de riesgos de desastres, sobre la base del Marco de Acción de Hyogo (MAH) (2005-2013) y Marco de Sendai (2015-2030), se ha reconocido a nivel internacional que las políticas públicas y acciones en materia de gestión integral de riesgo deben enfocarse en el aumento de la resiliencia de las comunidades y la reducción de las pérdidas y daños ante las amenazas naturales. El objetivo principal por alcanzar al 2030 es "La reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas que puedan ocasionar, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países" (UNISDR, 2015).

Evaluar el riesgo de desastres no significa simplemente estimar el daño físico esperado, damnificados o pérdidas económicas, sino también valorar factores sociales, así como la habilidad organizacional y la capacidad institucional. En materia de gestión de riesgos de desastres, la capacidad institucional se concibe como la capacidad administrativa y de gestión de un territorio, principalmente en la aplicación de políticas públicas para responder de manera eficiente y adecuada ante las amenazas.

Entre los cambios más importantes entre estas perspectivas se encuentra el marcado énfasis puesto en la "gestión del riesgo de desastres" en lugar de la "gestión de desastres". Por lo que los gobiernos deben adoptar medidas específicas en todos los sectores, desde lo local a lo global, basándose en las cuatro prioridades de acción del Marco de Sendai: 1) comprender el riesgo de desastres, 2) fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo, 3) invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia y 4) aumentar la preparación para casos de desastres a fin de dar una respuesta eficaz y accionar una recuperación, rehabilitación y reconstrucción de mejor manera (UNISDR, 2015).

México desde 1986 ha establecido su propia gestión de riesgo, a partir de la tragedia sufrida por el temblor de 1985. Es así, que, por decreto presidencial, en 1986 se establece el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC). Posteriormente, en 1988, con el apoyo del gobierno de Japón, se crea el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), instancia concebida para mejorar los conocimientos existentes en prevención de desastres, contribuyendo en actividades de investigación y desarrollo, apoyado por el personal académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quedando como un órgano administrativo desconcentrado, jerárquicamente subordinado a la Secretaría de Gobernación (SEGOB). Años más tarde, en el año 2000, para establecer las bases de coordinación entre los distintos órdenes de gobierno en materia de protección civil, se decreta la primera Ley General de Protección Civil (LGPC), la cual se reformó en junio de 2012, diciembre de 2017 y julio 2018. Lo anterior, creó un sólido marco institucional y de políticas públicas en el país, dando lugar a las funciones y responsabilidades de la evaluación de riesgos en México, cuyo enfoque involucra una mejor comprensión científica de las amenazas, que entre sus pretensiones se encuentran el desarrollo y actualización de los Atlas de Riesgo, como herramientas de planeación territorial (Hernández y López, 2020).

Los Atlas de Riesgo (AR) constituyen el marco de referencia para la elaboración de políticas y programas en todas las etapas de la "Gestión Integral del Riesgo"; asimismo, se establece que el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la institución técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil que tiene entre sus atribuciones la integración del Atlas Nacional de Riesgos (ANR) (DOF, 2014). De acuerdo con Guevara, et. al. (2006), los antecedentes del Atlas Nacional de Riesgo (ANR) se remontan a 1991, cuando la Secretaría de Gobernación publicó una primera versión del "Atlas Nacional de Riesgos" y posteriormente el "Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en la República Mexicana", elaborado por el CENAPRED en 2001. Asimismo, en 2004, CENAPRED publica la primera "Guía Metodológica para la elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel de Ciudad, Identificación y Zonificación" y la "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo". El Gobierno Federal, a través de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), desarrolló para el ejercicio fiscal 2017, el Programa de Prevención de Riesgos (PPR), actual rector para el desarrollo de los AR. Este programa tiene sus antecedentes de la fusión del Programa de Prevención de Riesgos en los Asentamientos Humanos (PRAH), manejado por lo que fue la Secretaría de Desarrollo Social en 2011 (SEDESOL) y operado hasta 2015. Desde 2016, 2017 y 2018 se publica la "Guía de Contenido Mínimo para los Atlas de Riesgo" y sus reglas de operación en el Diario Oficial de la Federación (DOF), con la finalidad de contar con criterios homogéneos para establecer los elementos y características mínimas que deberán contener los AR estatales y municipales, a fin de posibilitar su integración de manera uniforme al ANR.

Los AR se conciben como instrumentos de planificación que sirven de base al conocimiento del territorio y de los peligros que pueden afectar a la población y a los servicios básicos de las ciudades, y a su vez, permiten hacer una mejor planeación del desarrollo urbano y de esa forma contribuir a la toma de decisiones para la reducción de riesgo de desastres. En los AR se establecen los diferentes niveles de peligro y riesgo, para todos los fenómenos que influyan en las distintas zonas. Dichos instrumentos deberán ser tomados en consideración por las autoridades competentes, para la autorización o no de cualquier tipo de construcciones, obras de infraestructura o asentamientos humanos. Los usuarios finales de los AR, son las autoridades competentes de los gobiernos locales, cuyo objetivo principal es que cuenten con una herramienta geográfica para ubicar e identificar el tipo y grado de amenazas, susceptibilidad, peligros, riesgos y/o índice de exposición existente de acuerdo con el origen de los mismos, a diferentes escalas.

Este Atlas de Riesgo del municipio de Tulum está compuesto por un conjunto de mapas de los fenómenos perturbadores (peligros) y de los riesgos naturales con las condiciones de vulnerabilidad de la población e infraestructura estratégica. Los mapas cuentan con una serie de capas relacionadas entre sí que representan la magnitud y ubicación del peligro o del riesgo para un sistema afectable. Inicialmente se hace una descripción del área de estudio (municipio de Tulum); más adelante se describen y analizan los fenómenos perturbadores que podrían presentarse en el área de estudio; se caracterizan los elementos sociales, económicos y demográficos, es decir, los elementos vulnerables ante la presencia de fenómenos perturbadores; en último capítulo se identifica el riesgo ante fenómenos perturbadores a partir de la integración y análisis de los elementos descritos en los capítulos anteriores.

Para la realización de este Atlas, primero se diseñó y construyó un Sistema de Información Geográfica (SIG) que integra los elementos de peligro, vulnerabilidad y riesgo. Los dos primeros a partir de datos base, y el último sistema a partir de los resultados derivados de un análisis espacial. Las bases de datos espaciales creadas pueden ser consultadas y actualizadas desde cualquier programa de cómputo de SIG. Las principales fuentes de datos para este estudio fueron, en primer lugar, el gobierno municipal de Tulum, INEGI, COESPO, CONAPO, CONABIO, CONAGUA, SCT. Por otra parte, diversas dependencias del gobierno municipal aportaron datos muy valiosos y significativos. De igual manera, se desarrolló trabajo y levantamiento en campo para corroborar, corregir y actualizar datos de infraestructura urbana (gasolineras, escuelas y edificios públicos). Los límites de las zonas urbanas de las localidades fueron actualizados a partir de imágenes de satélite y fotografías aéreas con vehículo aéreo no tripulado, comúnmente conocidos como dron.

Los mapas generados tienen una escala 1:210,000 cuando el tema presentado está fuera de la cabecera municipal, para la cual se usa una escala de 1:50,000; están divididos en cuatro diferentes temáticas: la primera corresponde a las características naturales del medio físico (Fisiografía, Geología, Geomorfología, Edafología, Hidrología, Climatología, Uso de Suelo y Vegetación y Áreas Naturales Protegidas). Posteriormente se presenta el conjunto de peligros "Geológicos e Hidrológicos", en donde se muestran las áreas de ocurrencia ante cada fenómeno natural a escala 1:210,000 y 1:50,000, según corresponda. Enseguida se muestran los mapas de vulnerabilidad calculados a partir de variables socioeconómicas en las localidades dentro del área del municipio. Por

último, se muestran los mapas de riesgos determinados en base al peligro y vulnerabilidad, zonificando por grado de impacto para cada fenómeno perturbador. Para estos últimos mapas se representaron algunos fenómenos como huracanes o tormentas tropicales a una escala de 1:210,000 por ser eventos de grandes dimensiones; mientras que otros fenómenos más locales como inundaciones, se representan a una escala de 1:50,000. Adicionalmente se incluyen como anexos los metadatos, memoria fotográfica, fichas de campo y demás información de apoyo empleada para la conformación de este documento.

Esta actualización aquí presentada del Atlas de Riesgo del municipio de Tulum 2022, resultado de un análisis espacial y temporal sobre la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición de los agentes afectables, fortalecerá las acciones esenciales de la protección civil y de la reducción del riesgo de desastre. La interpretación de los datos y la cartografía generada contribuirá a detectar, clasificar y zonificar las áreas de: peligros, vulnerabilidad y riesgos, dando lugar a una correlación entre las zonas propensas al desarrollo de fenómenos perturbadores y el espacio físico vulnerable, tomando en consideración aspectos como infraestructura, vivienda, equipamiento e indicadores socioeconómicos y demográficos, entre otros. Por lo que al poder identificar el tipo, grado de amenaza, periodos de retorno, e índices de exposición, desde una manera científica y con bases metodológicas comprobadas, el gobierno municipal se encuentra en la posición de utilizar toda esta información derivada, como una herramienta técnica para un alertamiento oportuno y formal, identificando fases, tiempos y acciones que pueden convertirse en Sistemas de Alerta Temprana (SAT) con el objetivo de proteger a las personas y sus medios de vida (Hernández y López, 2020).

2. Antecedentes

En México, los riesgos hidrometeorológicos tienen grandes repercusiones, positivas y negativas, debido, entre otros factores, a la ubicación geográfica de sus poblaciones, su orografía y a los diversos sistemas meteorológicos que la afectan, pero principalmente a la distribución de su población, los grandes contrastes que ésta presenta y a su dinamismo, principalmente su crecimiento, en algunas partes intenso, y en otras en movimiento derivado de los fenómenos migratorios, tal es el caso del municipio de Tulum. Tulum muestra una alta vulnerabilidad al paso de huracanes por su localización geográfica y por ser una ciudad turística costera con crecimiento poblacional descontrolado.

El 13 de marzo de 2008 la XI Legislatura del Estado aprobó por unanimidad el dictamen de minuta del proyecto de decreto por el que se crea el Municipio de Tulum, convirtiéndolo en el noveno Municipio del Estado mexicano de Quintana Roo. Se localiza en la zona centro-norte del Estado y su territorio fue disgregado del Municipio de Solidaridad. Su integración territorial está compuesta por 177 localidades, de las cuales solo la ciudad de Tulum, como su cabecera municipal, es urbana (INEGI, 2020). Cuenta con una población de 46,721 habitantes, siendo 22,331 mujeres y 24,390 hombres (INEGI, 2020).

El municipio de Tulum se localiza al sureste de México, en el Estado de Quintana Roo entre las latitudes 88° 00’ a 87° 20’ y longitudes entre los 19° 46’ y 20° 31’. La superficie territorial del municipio es de 2,040.4 km², con colindancias al Norte con el municipio de Solidaridad, al Este con el Mar Caribe y la Bahía de la Ascensión, al Sur con el municipio de Felipe Carrillo Puerto y la Bahía de la Ascensión y al Oeste con el municipio de Felipe Carrillo Puerto, de acuerdo con su decreto de creación en 2008 (XII Legislatura del Estado Libre y Soberano de Quintana Roo, 2008)

Entre los últimos estudios que se han realizado para la ciudad y municipio de Tulum se encuentran el trabajo titulado “Índice de resiliencia urbana costera para el manejo de residuos sólidos urbanos” publicado en la Revista Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (Hernández-Aguilar, Martínez-Torres y López-Montejo, 2021), en el cual se determina el grado de resiliencia en el manejo de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de la ciudad costera de Tulum tras el impacto de un huracán. En este sentido, el enfoque de resiliencia se centra en la capacidad de respuesta institucional para la continuidad de operaciones durante una situación de emergencia. Otro trabajo es el del “Diagnóstico de la ciudad de Tulum” (Hernández, et. al, 2018) capitulo publicado en el libro Diagnóstico de ciudades costeras ante huracanes para la construcción de resiliencia por la Universidad de Quintana Roo, en el cual se realiza un análisis con la perspectiva de gestión del riesgo de desastres y sus elementos sociodemográficos y urbanos. Esta investigación se enmarca en un proyecto de investigación “Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres por huracanes: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen”, el cual fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT:248375, 2016-2019) bajo su programa “Atención a Problemas Nacionales”. De la misma manera se encuentra el capítulo “Resiliencia urbano-costera frente al cambio climático desde el enfoque socio-ecológico: el caso de Tulum, Q. Roo” (Hernandez, Frausto & Arroyo, 2019) dentro de la obra titulada Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres por huracanes, editado por la Universidad de Quintana Roo. Su objetivo principal fue abordar desde el pensamiento sistémico, conceptualizando las ciudades costeras como sistemas socio-ecológicos complejos y adaptativos; y con un enfoque interdisciplinario, el estudio de la resiliencia urbana ante los desastres por huracanes.

Ahora bien, como antecedente específico de la elaboración del Atlas de Riesgo para el municipio de Tulum, se cuenta con el trabajo de “Atlas de Riesgos Naturales del municipio de Tulum, Quintana Roo, 2015” elaborado por un grupo consultor y enfocado principalmente en la ciudad de Tulum, además de basarse en el Censo de Población y Vivienda de 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Diversas experiencias de desastres de gran magnitud ocurridos en las últimas décadas han marcado a muchas ciudades y regiones del país con importantes implicaciones sobre la población, la infraestructura y los sectores económicos (Mansilla y Rubio, 2010, cit. Hernández, 2014). El Estado de Quintana Roo, en general, y en particular, las localidades colindantes con el Mar Caribe son territorios de alto riesgo, amenazados principalmente por fenómenos hidrometereológicos, en menor medida los geológicos, ambientales y humanos.

El municipio de Tulum se identifica como una de las zonas de mayor riesgo de inundación por marea de tormenta, al poseer una línea costera muy baja, que implica la posibilidad de una fuerte penetración de agua marina como consecuencia, primordialmente, los que tienen su origen en el Mar Caribe. El mayor riesgo hidrometeorológico para el municipio son los huracanes. Cuya temporalidad de afectación de estos fenómenos naturales es de aproximadamente seis meses cada año. Se espera la llegada de estos fenómenos del primero de junio al treinta de noviembre. La ocurrencia de estos eventos trae consigo daños por el empuje del agua, el arrastre y la erosión, por la velocidad relativamente alta con que el agua penetra y se retira, ocasionando la contaminación de los acuíferos, pozos y daños a la vegetación, y en menor medida, a la producción agrícola, siendo una gran amenaza para la seguridad de sus habitantes. El impacto económico de estos fenómenos naturales en el Estado de Quintana Roo se ha visto reflejado en sus principales sectores como el turismo y la agricultura.

Los huracanes se consideran las tormentas más grandes y violentas de la Tierra. Como señala Hernández (2014), el término científico de un huracán es ciclón tropical, sin embargo, en su etapa más intensa, son conocidos por varios nombres según las regiones en donde ocurren (SEGOB/CENAPRED, 2007, cit. Hernández, 2014) huracanes en el Océano Atlántico, Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe; ciclones en el Mar de Arabia, Océano Índico, al este de Isla Mauricio, Madagascar y Bangaldesh y tifones en China y la costa de Japón. Dependiendo de su fuerza un ciclón tropical puede llamarse depresión tropical, tormenta tropical o huracán.

De acuerdo con la Revista Agua Simple (2022), publicación coeditada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Consejo Consultivo del Agua, A.C., el término huracán tiene varios orígenes: en primer lugar, se menciona el origen maya, derivado de un dios creador llamado Hurankén, quien, en el origen de los tiempos, esparció su aliento y puso orden en las aguas, creando así la Tierra. Este dios gobernaba el true-

no, el rayo, los vientos y las tempestades. En segundo lugar, mencionan a las Antillas y el mar Caribe, donde llamaba Juracán a un dios maligno. En tercer lugar, fueron los quechuas, en el sureste del continente americano, que usaron el nombre Hurakán para referirse al dios de los truenos y las tormentas. El Centro Nacional de Huracanes CNH (National Hurricane Center, 2022) de los Estados Unidos define a un huracán como un ciclón tropical con características específicas, es decir, si los vientos máximos sostenidos se encuentran entre 119 km/h (74 mph/64 knots) o mayores se denomina huracán, y si sus vientos son mayores a 178.64 km/h (111 mph /96 knots) se designa huracán mayor. Debajo de esta clasificación se encuentran la tormenta y la depresión tropical. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2022), por su parte, señala algo muy similar al CNH, cuando la evolución de un ciclón tropical pasa sus cuatro etapas de desarrollo puede llegar a convertirse en huracán (perturbación tropical, depresión tropical, tormenta tropical y huracán). Por su parte, en el Atlas de Ciclones Tropicales en México (Rosengaus et al. 2002, cit. Hernández, 2014) señala que el término de ciclón tropical se aplica a los sistemas débiles denominados depresiones tropicales; por lo tanto, se puede concluir que el término ciclón tropical es el término "científico" para estos fenómenos meteorológicos y huracán es en sí un ciclón tropical que ha evolucionado y alcanzado vientos mayores a 119 km/h.

Ahora bien, un ciclón tropical se puede definir como una gran masa de aire cálido y húmedo con fuertes vientos girando en forma de espiral alrededor de una zona de baja presión. Se originan en el mar entre las latitudes 5° a 15°, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en la época en que la temperatura del agua es mayor o igual 26° C. Cuando éstos se ubican en el hemisferio norte, giran en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Los ciclones tropicales tienen un área casi circular con la presión más baja en el centro, transportan gran cantidad de humedad y frecuentemente se trasladan con velocidades comprendidas entre 10 a 40 km/h (Rosengaus et al. 2002, cit. Hernández, 2014). Por su parte, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a escala nacional y local en nuestro país, depende de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Esta corporación define a un huracán como "un ciclón tropical en el cual los vientos máximos sostenidos alcanzan o superan los 119 km/h", donde el área nubosa cubre una extensión entre los 500 y 900 km de diámetro, produciendo lluvias intensas, asimismo el ojo del huracán alcanza normalmente un diámetro que varía entre 24 y 40 km, sin embargo, puede llegar hasta cerca de 100 km (CONAGUA, 2022).

Diversos ciclones tropicales han impactado las costas de Quintana Roo, la Coordinación Estatal de Protección Civil (COEPROC), incluye, desde su sitio web (https://qroo.gob.mx/coeproc/ciclones-tropicales-con-influencia-en-el-territorio-estatal/), los que han tenido mayor influencia en el estado (tabla 1), cubren un periodo de 22 años (1995 a 2017), sin embargo, después del 2017 existieron fenómenos meteorológicos que también tuvieron impacto, los cuales también se señalan.

Tabla 1. Ciclones tropicales con influencia en el territorio estatal (1995 – 2020)

AÑO	HURACÁN	LUGAR DE IMPACTO	ETAPA CATEGORÍA	PERIODO	VIENTOS MÁXIMOS (km/h)
1995	Roxane	Tulum	Huracán categoría 3	7 al 21 de octubre	185
1996	Dolly	Felipe Carrillo Puerto	Huracán categoría 1	19 al 25 de agosto	125
2000	Keith	La Unión	Huracán categoría 1	28 de septiembre al 6 de octubre	140
2005	Emily	Cozumel y Playa del Carmen	Huracán categoría 5	10 al 21 de Julio	269
2005	Wilma	Cozumel y Puerto Morelos	Huracán categoría 5	15 al 28 de octubre	324
2007	Dean	Mahahual	Huracán categoría 5	13 al 23 de agosto	270
2008	Arthur	Suroeste de Chetumal	Huracán categoría 2	31 de mayo a 2 de junio	160
2008	Dolly	Cozumel y Cancún	Huracán categoría 2	20 al 24 de Julio	160
2010	Karl	Al norte del poblado de Calderitas	Huracán categoría 3	14 al 18 de septiembre	195
2011	Rina	Felipe Carrillo Puerto, Cozumel, Isla Mujeres y Benito Juárez	Huracán categoría 2	23 al 28 de octubre	174
2011	Harvey	Othón P. Blanco y Bacalar	Tormenta Tropical	19 al 22 de agosto	91
2011	Don	Benito Juárez	Tormenta Tropical	27 al 30 de Julio	83
2012	Ernesto	Othón P. Blanco y Bacalar	Huracán categoría 1	1 al 10 de agosto	140
2014	Hanna	José María Morelos	Tormenta tropical	22 al 28 de octubre	64
2016	Colin	Isla Mujeres, Cozumel, Solidaridad, Benito Juárez, Lázaro Cárdenas, Puerto Morelos	Tormenta tropical	Del 05 al 07 de junio	83
2016	Earl	Othon P. Blanco	Huracán categoría 1	Del 02 al 06 de agosto	120
2017	Harvey	Felipe C. Puerto, Othón P. Blanco, Tulum, José M. Morelos, Bacalar.	Huracán categoría 4	Del 17 de agosto al 01 de septiembre	213
2017	Nate	Cozumel, Benito Juárez, Puerto Morelos, Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas, Solidaridad, Tulum	Huracán categoría 1	Del 04 al 09 de octubre	148
2017	Franklin	Tulum, Felipe C. Puerto, José María Morelos, Bacalar, Othon P. Blanco	Huracán categoría 1	Del 07 al 10 de agosto	138
2020	Cristóbal	Lázaro Cárdenas, Bacalar y Othon P. Blanco	Tormenta Tropical	Del 30 de mayo al 9 de junio	95
2020	Zeta	Playa del Carmen	Huracán categoría 3	Del 24 al 29 de octubre	185

Nota: Se presentan los años donde se registraron huracanes con influencia en el territorio estatal. La trayectoria del centro del sistema tropical Harvey en el 2017, no tuvo lugar de entrada en el territorio estatal, pero sí tuvo influencia en los municipios mencionados.
Fuente: Elaborado con base en COEPROC (2022) y National Hurricane Center (2022a).

Las ciudades costeras de todo el mundo, expuestas a los riesgos de desastre, causados por huracanes, enfrentan desafíos a largo plazo para garantizar la seguridad de sus habitantes, como resultado de los impactos directos e indirectos del cambio climático y, a menudo, acompañados por vulnerabilidades preexistentes. Hernández-Aguilar, Martínez-Torres & López-Montejo (2021) señalan que los ciclones tropicales se definen además como un fenómeno natural capaz de modificar el paisaje teniendo como agente perturbador principal el agua. El Centro Nacional de Huracanes, instancia del gobierno de Estados Unidos, es la encargada de monitorizar y predecir el comportamiento de depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes. Por lo que cuenta con bases de datos desde 1855 a la fecha sobre estos fenómenos. En la tabla 2 se muestra un histórico de 166 años de estas amenazas para el municipio de Tulum. Se puede observar que en este periodo de tiempo han sido un total de 33 fenómenos hidrometeorológicos que han tenido incidencia en el municipio. De estos existen amenazas sin datos, ya que el uso de la tecnología con mayor precisión inicia a partir de los años sesenta, por tal motivo, son los últimos años donde las predicciones tiene mayor confiabilidad y datos completos.

En este periodo de tiempo analizado en la tabla 2, han sido 8 depresiones tropicales (TD por sus siglas en inglés); 9 tormentas tropicales (TS por sus siglas en inglés); 6 huracanes categoría 1 (H1); 2 huracanes categoría 3 (H3); tres huracanes categoría 4 (H4); y un huracán mayor en 1887 (MH por sus siglas en inglés), del cual no se cuenta con mayores datos por la fecha del evento, por lo que se encuentra referido "sin nombre".

Fue el huracán Emily (2005) uno de los que ha ocasionado daños en el municipio. El ultimo fenómeno que se ha sentido, principalmente en la capital del municipio, la ciudad de Tulum fue el huracán Grace con categoría 1, con vientos máximos sostenidos de 137 km/h y 979 milibares de presión atmosférica (tabla 2).

De acuerdo con la escala de vientos sostenidos Saffir-Simpson, a partir de la categoría 3, 4 y 5 de huracán, donde los vientos oscilan entre 178-208 km/h a 252 km/h o mayores, se consideran huracanes mayores, debido a los tipos de daños que pueden ocasionar.

Tabla 2. Ciclones tropicales con influencia en el municipio de Tulum (1855 – 2021)

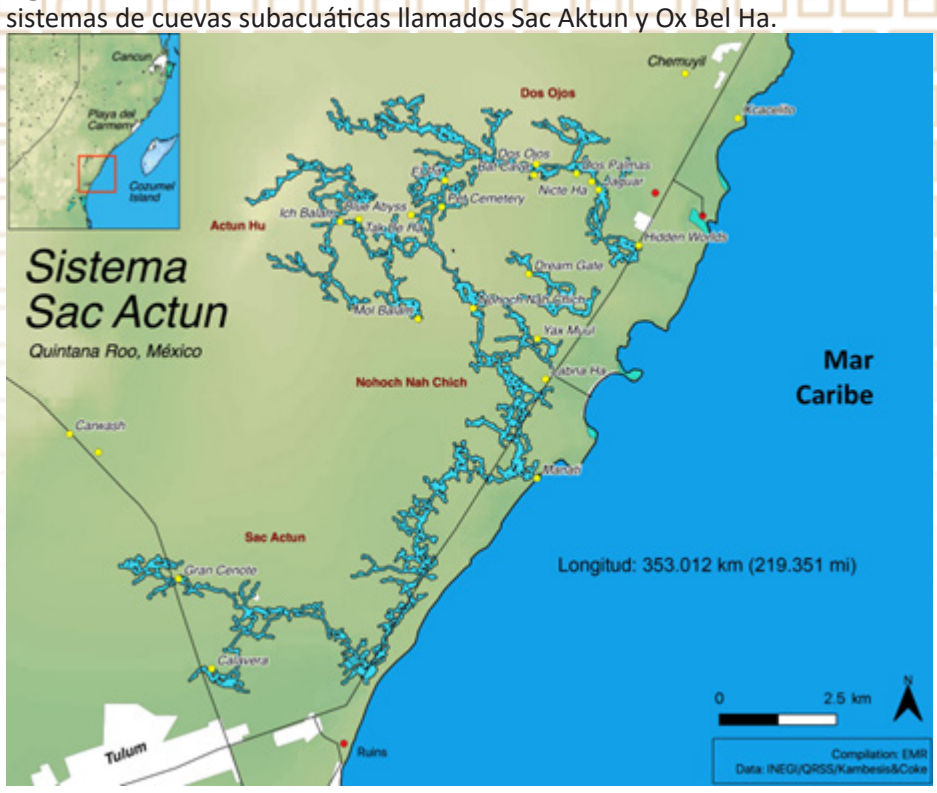
TEMPO-RADA	FECHA	NOMBRE	VIENTOS (km/h)	PRESIÓN (mb)	CATEGORÍA	
1855	1855-09-09	Sin nombre	-	-	-	-
1858	1858-06-13	Sin nombre	-	-	-	-
1870	1870-11-02	Sin nombre	74	-	Tormenta tropical	TS
1879	1879-08-20	Sin nombre	130	-	Huracán 1	H1
1880	1880-08-10	Sin nombre	-	-	-	-
1883	1883-09-20	Sin nombre	-	-	Tormenta tropical	TS
1886	1886-06-11	Sin nombre	-	-	Tormenta tropical	TS
1887	1887-10-13	Sin nombre	-	-	Huracán Mayor	MH
1888	1888-08-24	Sin nombre	-	-	Tormenta tropical	TS
1893	1893-09-04	Sin nombre	-	-	-	-
1894	1894-08-04	Sin nombre	-	-	Depresión tropical	TD
1895	1895-09-28	Sin nombre	65	-	Tormenta tropical	TS
1898	1898-09-23	Sin nombre	83	-	Tormenta tropical	TS
1905	1905-09-25	Sin nombre	69	-	Tormenta tropical	TS
1920	1920-09-20	Sin nombre	74	-	Tormenta tropical	TS
1922	1922-10-18	Sin nombre	139	-	Huracán 1	H1
1933	1933-09-22	Sin nombre	222	-	Huracán 4	H4
1935	1938-08-30	Sin nombre	46	-	Depresión tropical	TD
1938	1938-08-26	Sin nombre	194	-	Huracán 3	H3
1944	1944-08-22	Sin nombre	148	-	Huracán 1	H1
1947	1947-08-12	Sin nombre	83	-	Tormenta tropical	TS
1951	1951-08-20	Charlie	213	-	Huracán 4	H4
1965	1965-09-25	Debbie	46	1003	Depresión tropical	TD
1969	1969-10-18	Laurie	56	1005	Depresión tropical	TD
1972	1972-06-15	Agnes	50	-	Depresión tropical	TD
1973	1973-09-07	Sin nombre	46	-	Depresión tropical	TD
1995	1995-10-11	Roxanne	185	958	Huracán 3	H3
2000	2000-09-14	Gordon	46	1007	Depresión tropical	TD
2003	2003-09-28	Larry	37	1007	Depresión tropical	TD
2005	2005-07-18	Emily	213	955	Huracán 4	H4
2020	2020-10-03	Gamma	120	978	Huracán 1	H1
2020	2020-10-27	Zeta	135	977	Huracán 1	H1
2021	2021-08-19	Grace	137	979	Huracán 1	H1

Nota: TD: Depresión Tropical < 62.76 km/h; TS: Tormenta Tropical entre 62.76 y 117.48 km/h; H: Huracán entre 117.48 y 177.02 km/h y MH: Huracán Mayor > 177.02 km/h.
Fuente: NOAA's International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) data, accessed on [31/10/22] https://www.ncei.noaa.gov/data/international-best-track-archive-for-climate-stewardship-ibtracs/v04r00/access/csv/

Por otra parte, el municipio de Tulum, también ha sufrido daños por otras amenazas naturales, como por ejemplo, hundimientos, los cuales han sido confirmados por Protección Civil Municipal: uno en Akumal y dos en la Zona Hotelera de la ciudad de Tulum en 2015. Esto puede deberse a que en la región existen ríos subterráneos, cavernas, lo que genera que el suelo se vaya compactando, se va erosionando por la misma agua, entonces crean zonas que pueden estar en peligro de hundimiento, no olvidando que el tipo de relieve que predomina en el municipio es de tipo kárstico, que se origina por meteorización química de determinadas rocas, como la caliza, en este caso, compuesta de minerales solubles en agua.

Es importante señalar que en el municipio de Tulum convergen dos grandes sistemas de ríos subterráneos: el Sistema Sac Aktun (con 369.2 km de longitud a una profundidad media de 21 m y una máxima de 120 m) y el Sistema Ox Bel Ha (319.4 km de longitud), de los cuales se inicia su exploración en 1987. De la misma manera, existen otros cientos de sistemas que no pueden omitirse. En total en Quintana Roo existen registrados 1,658 km de cuevas freáticas (subacuáticas/inundadas) y 359.7 km de cuevas de vadosa (secas o semisecas). De acuerdo con Monroy-Ríos (2022), Sac Aktun es la cueva sumergida más larga del planeta Tierra, la cual se encuentra bajo el municipio de Tulum y está conectada con el Sistema Nohoch Nah Chich, convirtiéndose en el sistema de cuevas subacuáticas más largo del mundo. Estos datos de exploración se han ido actualizando mes con mes por grupos de espeleólogos, por lo que resulta difícil tener un dato exacto de estos ecosistemas (figura 1).

Figura 1. El área conurbada de Tulum se encuentra entre dos extensos sistemas de cuevas subacuáticas llamados Sac Aktun y Ox Bel Ha.



Datos: NASA/SRTM, INEGI, QRSS (2020). Disponible en: https://sites.northwestern.edu/monroyrios/entradas-en-espanol/sac-aktun/

El sistema Sac Aktun (cueva blanca) descarga agua dulce hacia el Mar Caribe a través de ojos de agua y en caletas como Xel-Ha. Se debe dar valiosa importancia a que estas salidas tierra adentro están controladas por fallas/fracturas y tienen una configuración lineal y de estructura trenzada y se alinean perpendiculares a la costa (Kambesis & Coke, 2016). Cuando desciende el nivel del mar, las cuevas antes llenas de agua se llenan de aire, perdiendo soporte y provocando el colapso del techo en diferentes secciones. El Sistema Sac Aktun cuenta con más de 220 cenotes, los cuales son derrumbes en el techo creando puntos de acceso a la cueva. Lo anterior, hace que el territorio de Tulum este propenso a hundimientos, subsidencias y colapsos. Si bien, quedan varios puntos por explorar, la conservación de estos sistemas de impactos externos debe ser prioridad.

Asimismo, los habitantes del municipio han sentido movimientos sísmicos. En el año 2015 se reportó un sismo de 4.2 con epicentro a pocos kilómetros de Tulum (Servicio Sismológico Nacional, SSN, 2015). Fue sensible en esa área, se presentó a 56 kilómetros al suroeste de Playa del Carmen a una profundidad de 5 km (figura 2).

Figura 2. Sismo de 4.2 en el municipio de Tulum, 2015



Disponible en: http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/bkpindex.jsp.

De la misma manera, en el municipio se han presentado lluvias intensas en 2014 y 2015 que han provocado inundaciones. En la primera hasta de 7 metros, principalmente en zonas bajas de la ciudad de Tulum, donde existe un parque vehicular y se encontraban camiones de basura, algunos de ellos siendo pérdida total. Se han tenido episodios de meses para que bajara el agua, donde se ubican las playas públicas, hacia la zona arqueológica. También se han presentado incendios en la parte urbana, en el basurero municipal, e incendios forestales en la Reserva de la Biosfera de Sian Kan.

Igualmente, se han presentado, en menor medida fenómenos socio-organizativos, principalmente donde existe concentración de población, como estadios, parques, donde se hacen bailes populares, entre otros. Otra amenaza de este tipo es el terrorismo por ataques armados, principalmente en la ciudad de Tulum. Existe también accidentes terrestres y aéreos con el desplome de una avioneta, a parte de los más comunes como son los accidentes de tránsito o carreteros.

Es por lo anterior, que algunos fenómenos naturales pueden llegar a convertirse en desastres. Para indicar si se declara desastre, emergencia o contingencia climatológica, se sigue la clasificación de fenómenos causantes de desastres utilizada en el Atlas Nacional de Riesgos, del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, https://www.gob.mx/cenapred) de la Secretaría de Gobernación.

Cada declaratoria responde a aspectos diferentes ante un evento perturbador: la declaratoria de emergencia está dirigida a la atención de la vida y la salud de la población, la declaratoria de desastre tiene por objeto proporcionar recursos para la reconstrucción de los daños sufridos en las viviendas y la infraestructura pública; en tanto que el objetivo específico de la declaratoria de contingencia climatológica (o de desastre natural en el sector agropecuario) es apoyar a productores agropecuarios, pesqueros y acuícolas, de bajos ingresos, para reincorporarlos a sus actividades en el menor tiempo posible ante la ocurrencia de contingencias climatológicas atípicas, relevantes, no recurrentes e impredecibles (SEMARNAT, 2015)

En la Tabla 3 se listan las declaratorias de emergencia registradas desde al año 2020 para el municipio de Tulum, se pueden observar que, solo se han declarado desastres y emergencias, no contingencias climatológicas.

Tabla 3. Declaratorias de desastres, emergencias y contingencia climatológicas para el municipio de Tulum

Fecha de publicación	Feche de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
09/11/2020	26/10/2020	Emergencia	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
05/11/2020	26/10/2020	Desastre	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
23/12/2019	01/05/2019 al 30/11/2019	Desastre	Sequía	Hidrometeoro-lógicos	Sequía severa
03/08/2018	23/07/2018 al 26/07/08	Emergencia	Temperatura extrema	Hidrometeoro-lógicos	Onda cálida
07/06/2018	28/05/2018	Emergencia	Temperatura extrema	Hidrometeoro-lógicos	Onda cálida
26/06/2018	15 de junio, 2018	Emergencia	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
26/06/2018	14/06/2018 al 15/06/2018	Desastre	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
26/10/2015	16/10/2015 al 17/10/2015	Emergencia	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
23/06/2015	13/06/2015 al 14/06/2015	Emergencia	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
22/06/2015	13/06/2015 al 14/06/2015	Desastre	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa y vientos fuertes
03/11/2014	22/10/2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
13/06/2014	31/05/2014 al 03/06/2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa
11/06/2014	31/05/2014 al 02/06/2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeoro-lógicos	Lluvia severa

Fuente: Diario Oficial de la Federación (DOF).

3. Objetivo

El objetivo de este Atlas es que el H. Ayuntamiento de Tulum, Quintana Roo cuente con un instrumento que permita identificar el tipo y grado de riesgos en su territorio, de acuerdo con el origen natural de los mismos, así como contar con una herramienta geoespacial que permita ubicar e identificar el tipo y grado de amenazas, susceptibilidad, peligros, riesgos y/o índice de exposición existente de acuerdo con el origen de los mismos a diferentes escalas, con el fin de diseñar estrategias que permitan, en escenarios futuros, reducir los efectos adversos ante una amenaza, y salvaguardar la vida de su población.

4. FASE 1 MARCO TEÓRICO

4.1. Determinación de los niveles de análisis y escalas de representación cartográfica

Para lograr una adecuada interpretación y evaluación del riesgo es importante tener el nivel de análisis de los elementos perturbadores que permita reconocer las características de peligrosidad de cada tipo de amenaza y proponer métodos de prevención y/o mitigación adecuados a las mismas.

El Atlas de Riesgo de Tulum está compuesto por un conjunto de mapas de referencia, peligros, vulnerabilidad y riesgos para la zona urbana de Tulum y el municipio del mismo nombre. La cobertura territorial y la desagregación de los datos de cada mapa dependerá de la temática que se indique en el apartado correspondiente. De acuerdo con la metodología desarrollada por la SEDESOL (2011), los mapas que componen el Atlas deben contar con una serie de capas relacionadas para representar la magnitud del peligro o del riesgo para un sistema afectable, así como la ubicación y dimensión física del peligro y del riesgo.

El presente trabajo constituye una actualización del Atlas de Riesgo publicado en el 2015. Sin embargo, a partir del análisis realizado a dicho documento se concluye que, para mejores resultados, los datos incorporados a esta nueva versión deberían ser, en lo posible, obtenidos a partir de sus fuentes originales y no directamente del Atlas mencionado.

Por las características geográficas y la extensión territorial del municipio, se han establecido dos escalas de análisis, una denominada municipal (escala 1:300,000) que abarca la extensión completa del municipio y su entorno geográfico adyacente. La otra escala corresponde a la extensión urbana de la localidad de Tulum (escala 1:28,000). Los mapas están divididos en grandes temáticas que corresponden a la descripción del medio físico (Fisiografía, Geología, Geomorfología, Edafología, Hidrología, Climatología, Uso de Suelo y Vegetación, y Áreas Naturales Protegidas).

Posteriormente se presentan los mapas de peligros (geológicos, hidrometeorológicos, químico-tecnológicos, sanitario ecológicos y socio-organizativos). Se continúa con los mapas de vulnerabilidad (social y física) para concluir con los mapas de riesgos determinados a partir de los mapas de riesgos y vulnerabilidad y con una valoración del nivel de afectación de los fenómenos perturbadores.

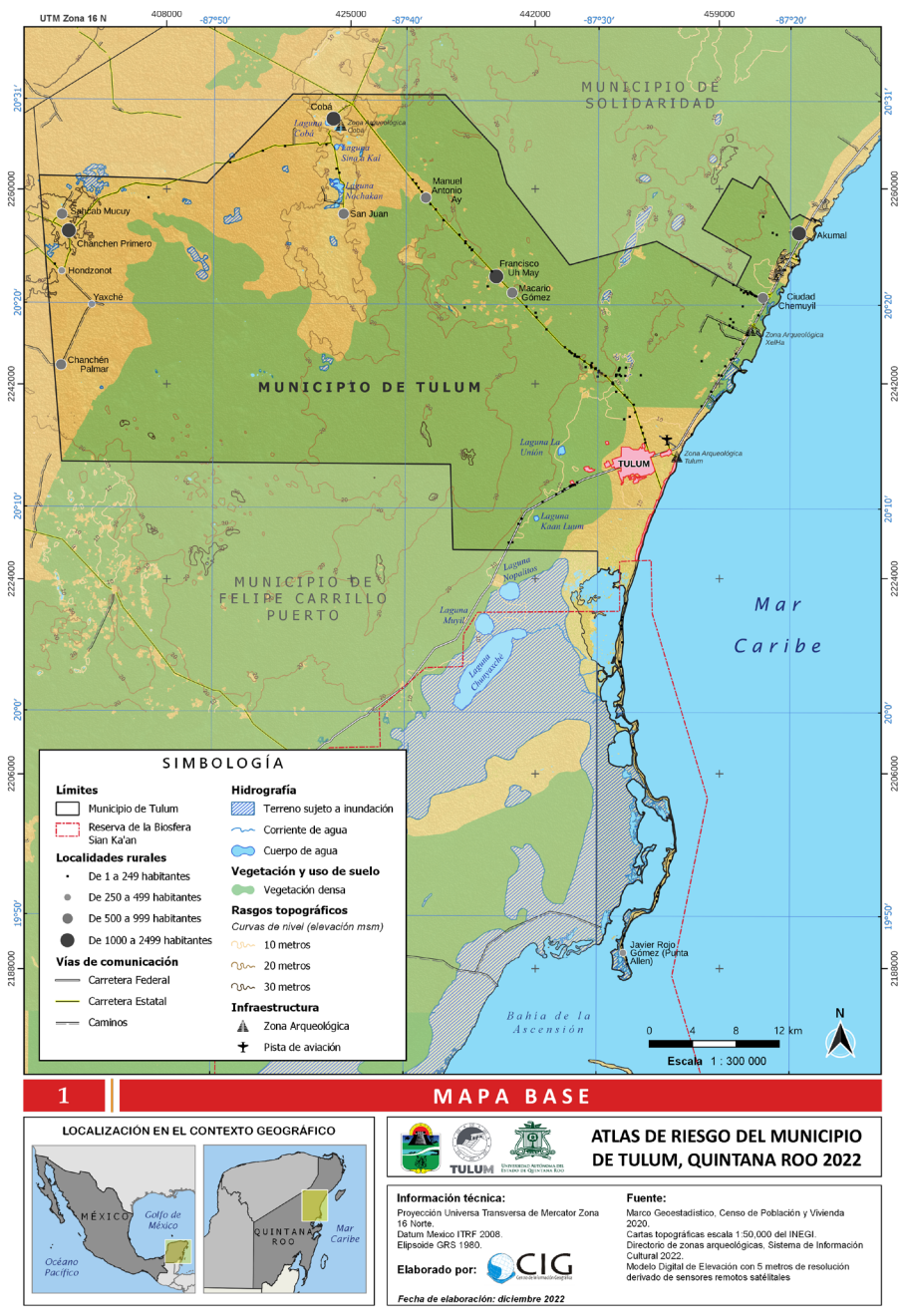
INDICADOR	DESCRIPCIÓN	NIVEL DE ANÁLISIS	ESCALA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA
FENÓMENOS GEOLÓGICOS.			
Vulcanismo	Investigación de la historia eruptiva de los volcanes más cercanos al municipio.	1	1:5,000,000
Sismos	Se ubicará al municipio en un mapa de la regionalización sísmica del país.	1	1:5,000,000
Tsunamis	Descripción del fenómeno.	1	1:5,000,000
Inestabilidad de laderas	Se ubicarán en un mapa las zonas con pendientes pronunciadas.	1	1:95,000
Flujos, caídos y derrumbes	Se ubicarán en un mapa las zonas con antecedentes de caídas y derrumbes.	1	1:95,000
Hundimientos	Se ubicarán en un mapa las zonas con antecedentes de hundimientos.	1	1:350,000
Subsidencias	Se ubicarán en un mapa las zonas con potencial de presentar subsidencias.	1	1:350,000
Agrietamientos	Se ubicarán en un mapa las zonas con potencial de presentar agrietamientos.	1	1:350,000
FENÓMENOS ASTRONÓMICOS.			
FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS.			
Ondas cálidas y gelidas	Análisis a partir de las estaciones hidrometeorológicas.	1	1:350,000
Sequías	Índices de aridez. Cartografía general de sequías en el municipio.	1	1:350,000
Heladas	Análisis de las estaciones hidrometeorológicas. Cartografía general de heladas en el municipio.	1	1:350,000
Tormentas de granizo y nieve	Análisis de registros históricos. Cartografía general en el municipio.	1	1:350,000
Ciclones tropicales	Descripción del fenómeno. Análisis del Índice de Peligro por Ciclones Tropicales (IPCT)	2	1:2,200,000

INDICADOR	DESCRIPCIÓN	NIVEL DE ANÁLISIS	ESCALA DE REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA
Tornados	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:2,200,000
Tormentas de polvo	Descripción del fenómeno.	1	1:350,000
Tormentas eléctricas	Descripción del fenómeno. Análisis de las estaciones hidrometeorológicas. Se elaborará cartografía general.	1	1:350,000
Lluvias extremas	Descripción del fenómeno. Análisis de las estaciones hidrometeorológicas. Cálculo de los periodos de retorno de lluvias extremas y su inundación.	2	1:350,000
Inundaciones fluviales, costeras y lacustres	Descripción del fenómeno. Análisis de las estaciones hidrometeorológicas. Cálculo de los periodos de retorno de inundaciones por marea de tormenta.	2	1:350,000
FENÓMENOS QUÍMICOS TECNOLÓGICOS			
Almacenamiento de sustancias peligrosas	Análisis de los sitios de producción y/o almacenamiento de sustancias peligrosas.	1	1:350,000
Incendios forestales	Análisis para determinar el potencial de incendios forestales en el municipio.	2	1:350,000
FENÓMENOS SANITARIO ECOLÓGICOS			
Contaminación de suelo, aire y agua	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:350,000
Epidemias y plagas	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:350,000
FENÓMENOS SOCIO-ORGANIZATIVOS			
Demostraciones de inconformidad social	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:20,000
Concentración masiva de población	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:20,000
Terrorismo	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:20,000
Vandalismo	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:20,000
Accidentes terrestres	Descripción del fenómeno. Se elaborará cartografía general.	1	1:20,000

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de proyección cartográfica empleado para la elaboración de la cartografía en este Atlas es Universal Transversa de Mercator (UTM) y como Datum de referencia el ITRF08 Época 2010, que es el nuevo Sistema Geodésico de Referencia Oficial para México (INEGI). La indicación de este sistema de referencia es observable en la esquina inferior derecha de cada mapa generado.

Figura 3. Mapa base del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Caracterización de los elementos del medio natural

4.2.1. Fisiografía y geomorfología

México es un territorio de gran biodiversidad, caracterizado por una topografía contrastada con enormes sistemas montañosos, llanuras y mesetas. Por ejemplo, su compleja y diversa topografía en más del 65% de su superficie se encuentra a más de mil metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y alrededor del 47% tiene pendientes superiores a 27°. Por un lado, algunas cumbres montañosas superan los 5,000 m.s.n.m., por otro lado, ciudades en la costa como Tulum, Playa del Carmen, etc., tienen una altitud no mayor a 10 metros.

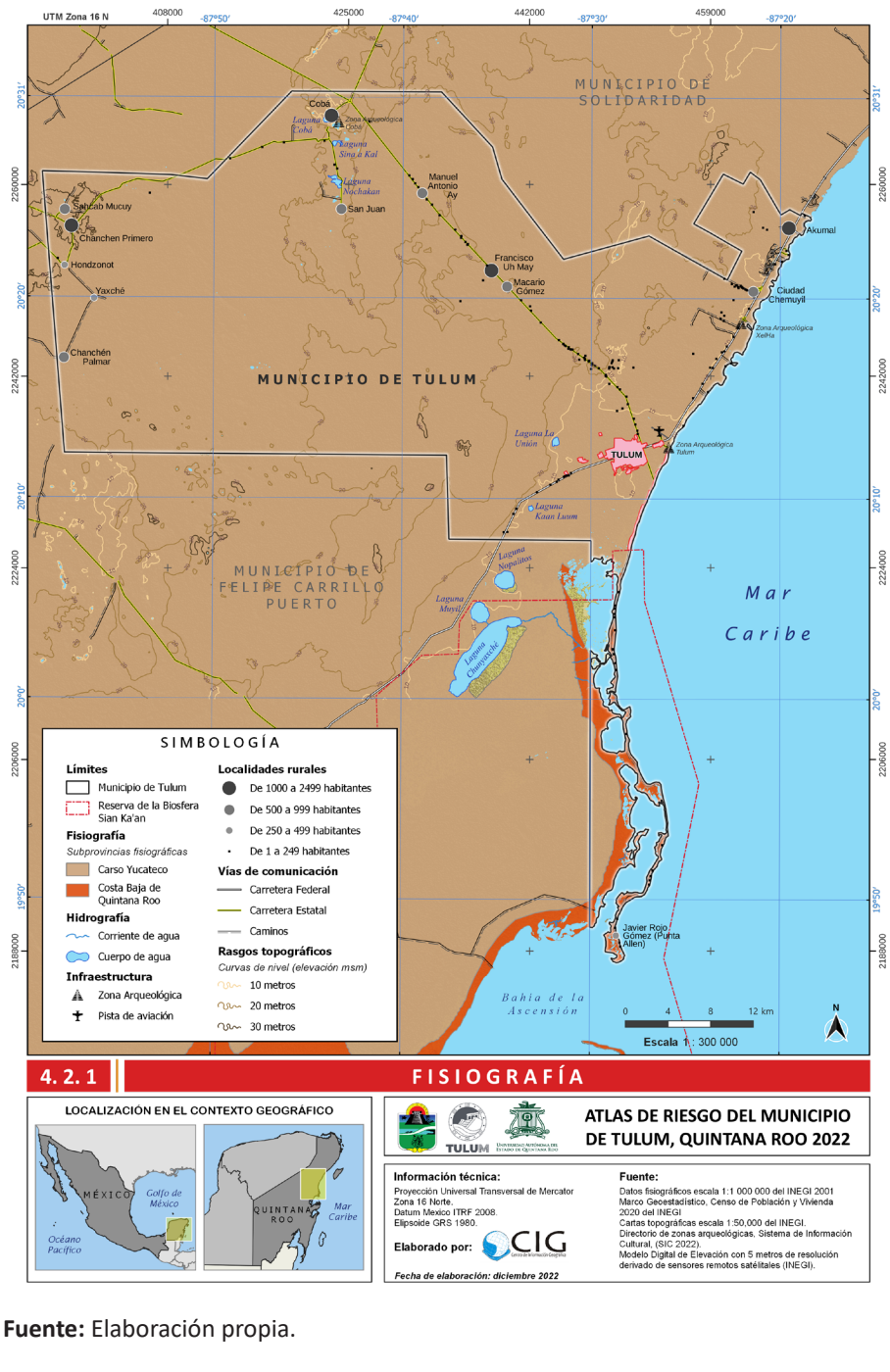
Esta diversidad del terreno se ha clasificado en 15 provincias fisiográficas (INEGI, 1981) con orígenes geológicos similares y condiciones topográficas, hidrológicas y edafológicas similares. A su vez, estas provincias se dividen en subprovincias fisiográficas, que son superficies del territorio con características topográficas distintivas. Finalmente, dentro de cada subprovincia se delimitan las topoformas, que son el conjunto de formas del terreno asociadas a algún patrón estructural, degradativo y/o acumulativo (INEGI, 2016).

En este sentido, el municipio se encuentra dentro de la provincia fisiográfica "Península de Yucatán". Esta es una plataforma calcárea de superficie plana cercana al nivel del mar y con algunos lomeríos conocidos comúnmente como "Sierrita de Ticul". Es de origen marino por lo que empezó a emerger hace 26 millones de años.

Esta provincia fisiográfica ha desarrollado una red cavernosa subterránea por la cual fluyen corrientes de agua lo que da origen a colapsos del terreno (cenotes) y hondonadas que se llenan de agua en época de lluvias (aguadas).

Esta provincia fisiográfica se subdivide en tres subprovincias denominadas *Carso Yucateco*, *Carso y Lomeríos de Campeche* y *Costa Baja de Quintana Roo*. El municipio de Tulum se encuentra en dos de estas subprovincias, el 95% de su territorio se encuentra sobre la subprovincia denominada *Carso -yucateco* y el otro 5% en la subprovincia *Costa Baja de Quintana Roo*.

Figura 4. Mapa de fisiografía de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en el mapa, la parte del territorio de Tulum que se encuentra dentro de la subprovincia *Carso Yucateco* se encuentra al norte del mismo, presenta un relieve plano y esta constituida por rocas calizas del terciario con presencia de fósiles de tipo arrecifal; presenta abundantes estructura de hundimiento (dolinas) y estructura de colapso (cenotes)(INEGI, 2016).

La porción costera al sur del municipio de Tulum corresponde a la subprovincia *Costa de baja de Quintana Roo*, misma que limita al este con el Mar caribe presentando suelos poco profundos, mayormente salinos y saturados.

Las topoformas presentes en el municipio de Tulum se dividen en Llanuras (94.4% de su superficie) y Playas en la zona costera (5.6% de su superficie). En la Tabla 4 pueden observarse las superficie y porcentajes de las topoformas presente en Tulum.

Tabla 4. Superficies de las topoformas presentes en el municipio de Tulum.

Topoforma	Superficie (km²)	Porcentaje
Llanura rocosa con hondonadas someras de piso rocoso o cementado	165.71	8.32%
Llanura rocosa de piso rocoso o cementado	1,003.79	50.43%
Llanura rocosa de transición de piso rocoso o cementado	709.76	35.65%
Playa o barra de piso rocoso o cementado	57.40	2.88%
Playa o barra inundable y salina	53.98	2.71%
Total resultado	**1,990.62**	**100%**

Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales del INEGI (2016).

Las llanuras rocosas o de piso cementado presentan un pobre desarrollo del suelo, mientras que las llanuras rocosas con hondonadas se presentan en las partes bajas y es común que tengas zonas inundadas y suelos un poco mejor desarrollados, de color rojizo a obscuro.

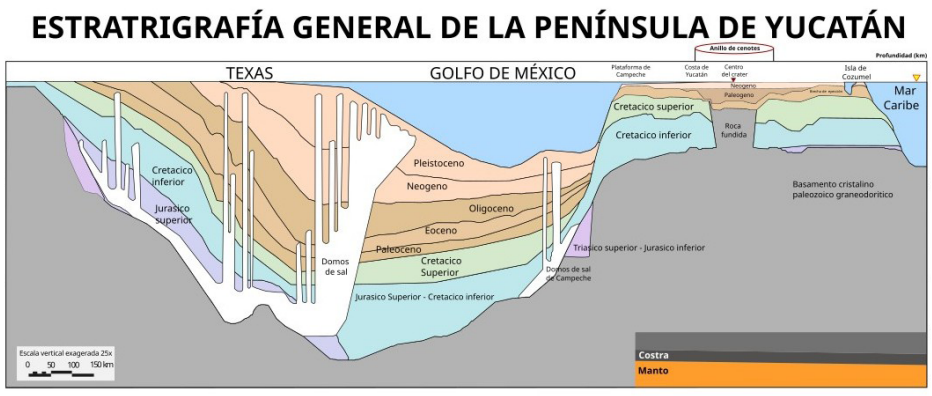
Las playas o barras de piso rocoso o cementado tienen suelos de textura media donde predominan los leptosoles; y las playas o barras inundables y salinas están conformada por suelos arenosos producto de la desintegración de roca caliza y restos minerales de los arrecifes cercanos a la costa, es común la presencia de lagunas costeras.

4.2.2. Geología

La Península de Yucatán emergió del mar hace aproximadamente 65 millones de años, durante el período Cretácico Superior y el Paelogeno. Su constitución es principalmente una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino con algunos depósitos de limo y arena que se han acumulado por millones de años en el fondo del océano.

La actividad tectónica ha levantado y expuesto la superficie de lo que hoy es la Península de Yucatán, sin embargo, se encuentra en un lento y continuo hundimiento (Bonnet & Butterlin, 1962).

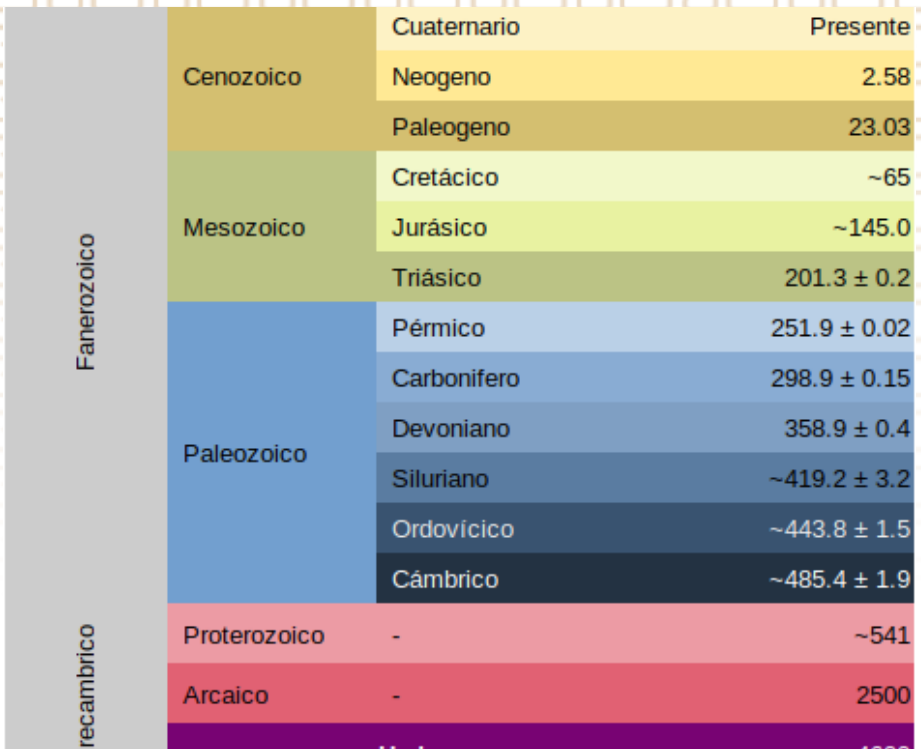
Figura 5. Diagrama de la estratrigrafía de la Península de Yucatán.



Fuente: Traducción del Diagrama elaborado por el Dr. Emiliano Monroy Ríos en *Historia Geológica de la Península de Yucatán* (https://sites.northwestern.edu/monroyrios/resources/historia-geologica-py/)

Para poder determinar la escala temporal geológica (tiempo de formación de la superficie terrestre) se utilizan las divisiones de los cuerpos de roca del subsuelo, en lo que se llama *Unidades Cronoestratigráficas*. Estas divisiones están dadas por las características de formación de las capas terrestres y su registro en las rocas.

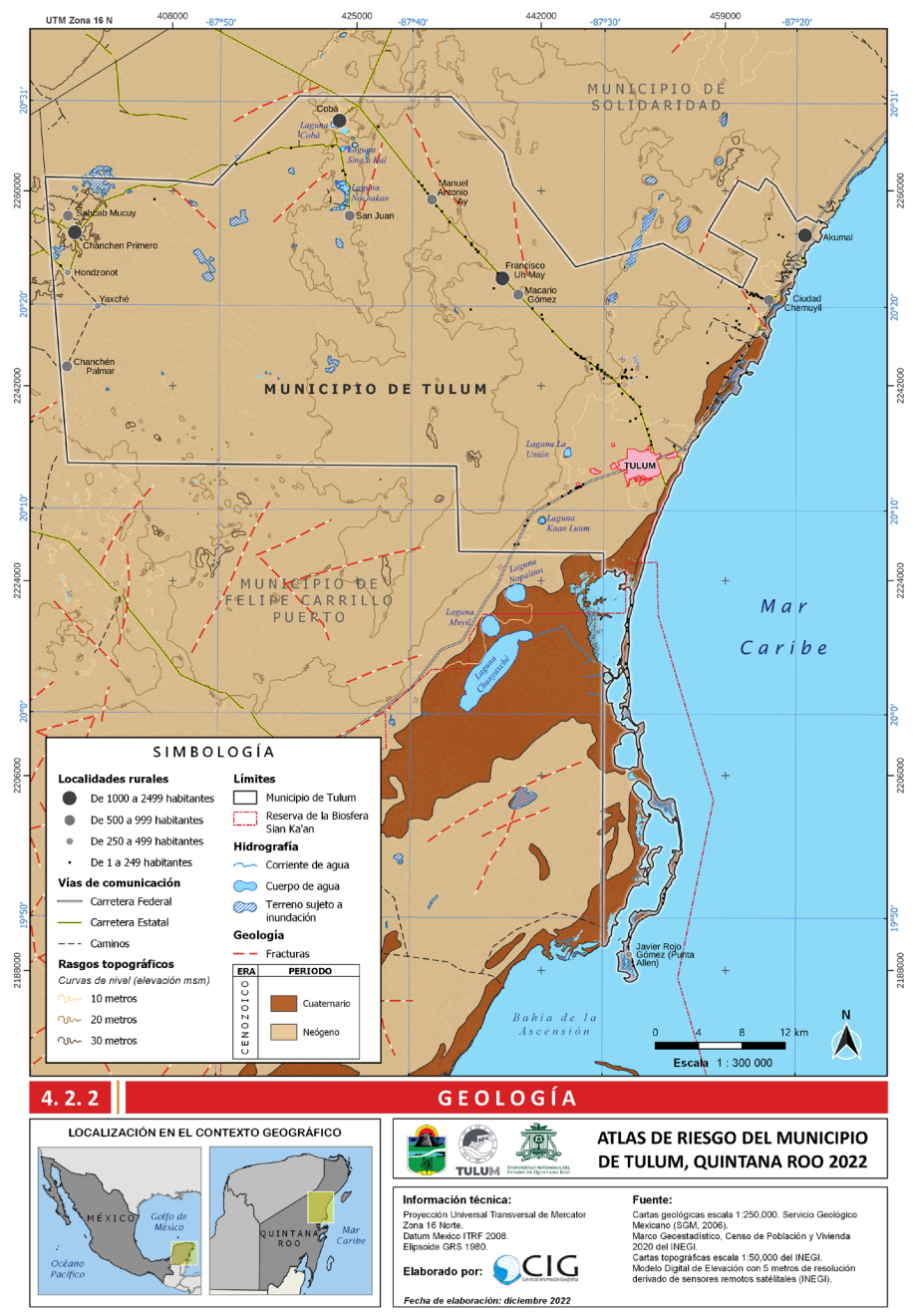
Figura 6. Descripción de las Eras Geológicas.



Fuente: Elaboración propia a partir del gráfico de la *International Commission of Stratigraphy* (2017) [www.stratigraphy.otg].

La unidad cronoestratigráfica presente en el municipio de Tulum corresponde a la Era Cenozoica, particularmente al periodo Neogeno, está conformada por roca caliza y distribuida en el 96.27% de la superficie municipal, tal como se puede observar en la tabla 5. La superficie restante está cubierta por cuerpo de agua (0.11%) y suelos (3.62%) de tipo eólico, lacustre, litoral y palustre.

Figura 7. Mapa de geología del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Las formaciones calizas del municipio alcanzan espesores mayores a los 1,500 metros (Ward et al., 1985), y yacen sobre rocas igneas y metamórficas. Los primeros 120 metros, desde la superficie, corresponden a calizas masivas cristalizadas y cavernosas de gran permeabilidad. Hacia el norte de estas calizas se encuentra otra capa de margas y calizas casi impermeables con espesor de varios centenares de metros (García Gil & Graniel Castro, 2011).

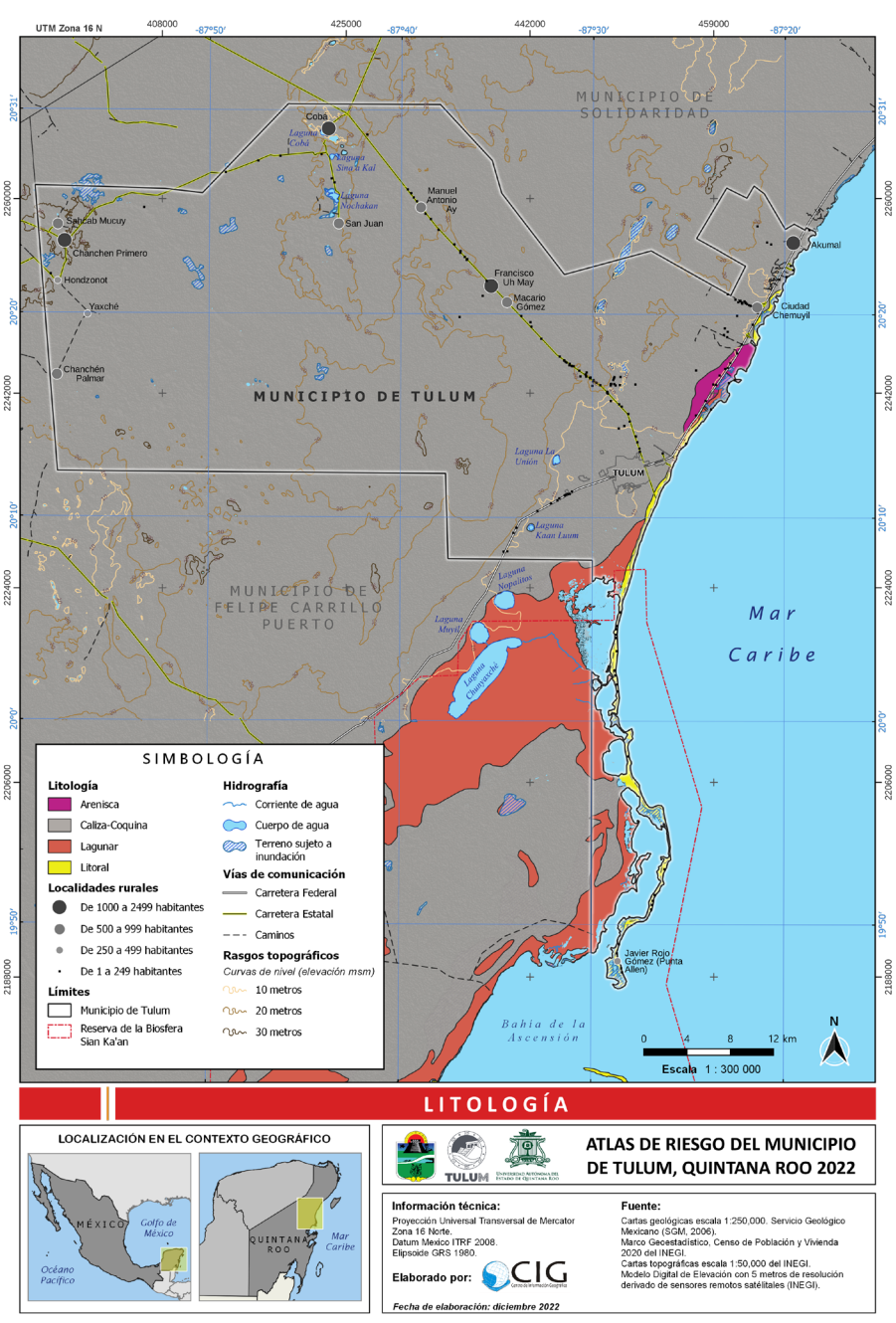
Tabla 5. Superficie de las unidades cronoestratrigráficas del municipio de Tulum.

Cuerpo de agua perenne							
Superficie (km²)			%				
2.245			0.11%				
Caliza (del Neogeno)							
Superficie (km²)			%				
1964.911			96.27%				
Suelo (del Cuaternario)							
Eólico	%	Lacustre	%	Litoral	%	Palustre	%
4.350	0.21%	47.163	2.31%	18.996	0.93%	3.2756	0.16%

Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales del INEGI (2016).

Este tipo de rocas calizas provoca que en periodos de lluvias se infiltre rápidamente el agua, disolviéndolas y formando un relieve denominado karst o cárstico. El relieve kárstico se forma por la disolución de rocas calcáreas formadas por calcita, y dolomita y evaporitas como el yeso. Se caracteriza por la formación de depresiones cerradas (de tamaños que van desde formas milimétricas como los lapiaces, hasta grandes extensiones como los poljes) por la rápida infiltración del agua, la casi nula presencia de corrientes superficiales, un sistema subterráneo de agua y la abundancia de cuevas y cavernas (de Waelle, et al, 2011).

Figura 8. Mapa de litología del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

La distribución de fallas, fracturas y formas kársticas no es homogénea. Por el contrario, a pesar de encontrarse distribuidas en gran parte de la península, tienden a concentrarse más en algunos sitios (Fragoso et al., 2014). Los sitios que tienen procesos avanzados de disolución kárstica y donde se concentra más la presencia de fallas y fracturas pueden ser denominadas sitios tectokársticos.

La región costera es una franja paralela a la costa de más o menos 20 km de ancho, en la que afloran calizas compactas recristalizadas, de ambiente marino en facies de banco y litoral de textura fina a media, dispuestas en capas masivas de color crema y blanco, con abundantes microfósiles conservados en la mayoría de los casos como moldes externos de pelecípodos, así como miliólidos indeterminados. La unidad presenta algunos horizontes calcáreo-arcillosos friables y margas blancas; se encuentran rocas del Cuaternario principalmente (coquinas, suelos residuales, arenas, arcillas y turbas); y comprende playas de barrera y lagunas de inundación, así como una serie de bahías someras en las que se presenta el fenómeno de intrusión salina. La zona costera está constituida por calizas masivas de moluscos de color blanco a crema del Pleistoceno-Holoceno. Sus afloramientos conforman una banda más o menos amplia a lo largo de la costa, la cual registra un espesor estimado de 80 m y descansa sobre las calizas de la formación geológica denominada *Carrillo Puerto* del Mioceno Superior-Plioceno.

4.2.3. Edafología

La edafología se centra en el estudio de los suelos, así como en el análisis de los procesos que llevan a su formación y cambio. La formación del suelo está relacionada con tres principales sucesos, que ocurren secuencialmente. El primero de ellos es la meteorización física o mecánica de la roca madre, el segundo es un proceso químico donde los minerales reacción con elementos del entorno natural y el último proceso es biológico donde la descomposición de la materia orgánica forma una capa llamada humus.

El suelo está formado por capas denominadas horizontes definidos por el color, textura, estructura, contenido de materia orgánica, presencia de minerales. El grosor de ellos depende de la madurez del suelo. Los horizontes se denominan del A al C, el A es la capa superficial de color oscuro formada por el humus y donde se asientan los seres vivos; el B es el horizonte de acumulación de sales minerales e iones procedentes del horizonte A, y arrastrados por el agua; y el horizonte C es la zona donde el suelo hace contacto con la roca madre (Buol, 2011).

En México existen 26 grupos de tipos de suelo, sin embargo dominan los Leptosoles (28.3% del territorio), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%), este tipo de suelos agrupan el 82% de la superficie nacional (INEGI, 2017).

La región de Tulum es una zona calurosa y húmeda, consecuencia de una gran cantidad de precipitación y un clima cálido. Esto significa que el suelo de la región es muy fértil, rico en nutrientes orgánicos y minerales (calcio, magnesio y fósforo) y con un contenido de materia orgánica alto. Sin embargo, existen suelos arenosos y arcillosos.

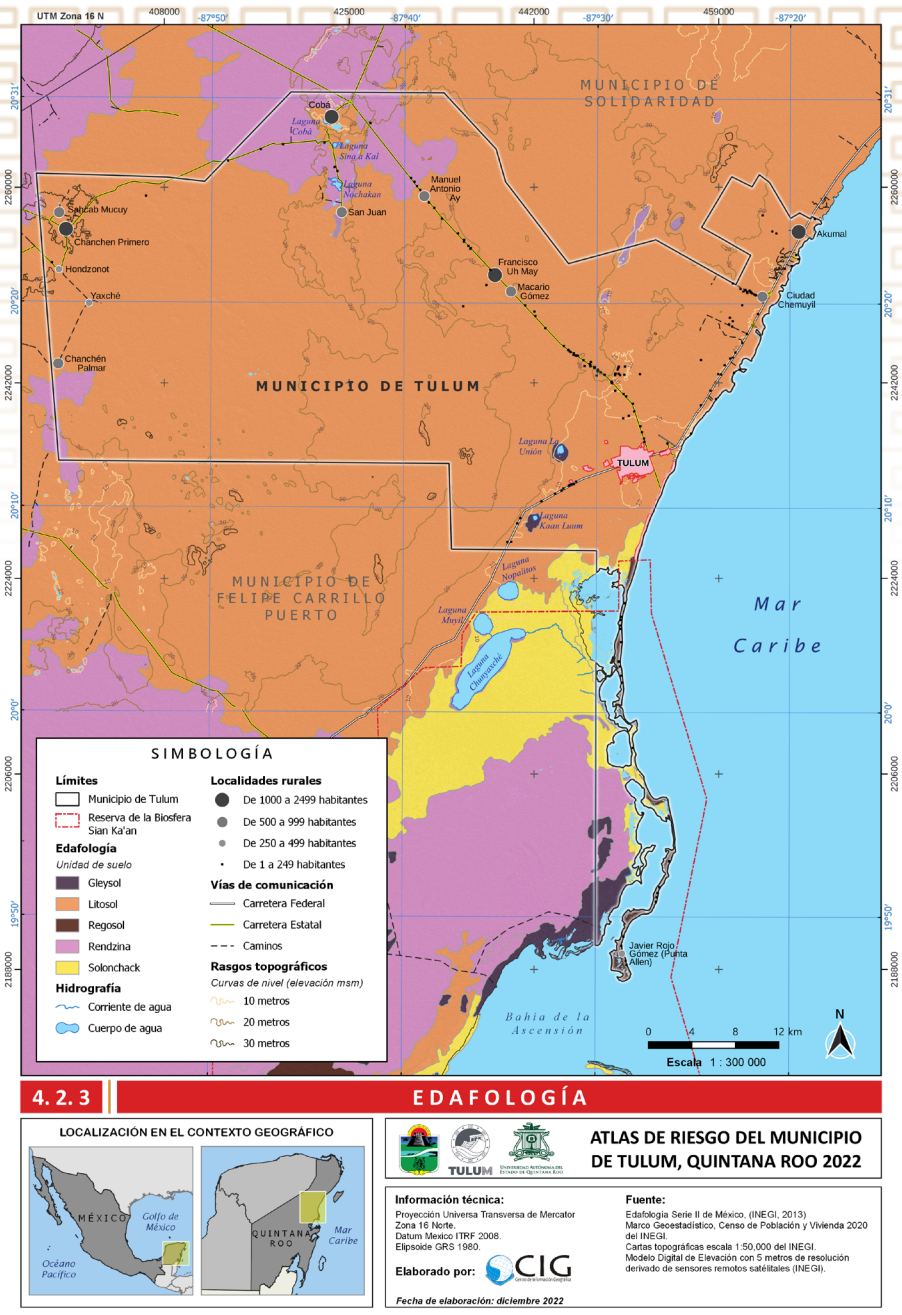
En este apartado se presentan los suelos dominantes y su superficie calculada a partir de la extensión total del municipio de Tulum (2,040.94 km²), los cuales son:

Tabla 6. Tipos y superficie de suelos dominantes en el municipio de Tulum.

Tipo de suelo	Superficie (km²)	Porcentaje
Gleysol Éutrico	4.69	0.23%
Gleysol mólico	14.15	0.69%
Leptosol	1763.99	86.43%
Cuerpo de agua	5.012	0.25%
Regosol calcárico	38.09	1.87%
Rendzina	147.97	7.25%
Solonchack gléyico	10.41	0.51%
Solonchack mólico	56.63	2.77%
	2,040.94	**100.00%**

Fuente: Elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales del INEGI (2016).

Figura 9. Tipos de suelo en Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, la mayor parte del territorio del municipio de Tulum está cubierta de suelos tipo Leptosol. Este tipo de suelo es delgado y poco desarrollado con una gran cantidad de material calcáreo; se encuentran en todos los climas y es común en las planicies de calizas superficiales como las de la Península de Yucatán. Sus condiciones calcáreas y de alta peligrosidad limitan su uso en la agricultura, por lo que es preferible mantenerlos con su vegetación original.

Estos suelos son muy susceptibles a la erosión hídrica y la salinización, por lo que es importante conservarlos para evitar la degradación de los ecosistemas y la reducción de los recursos hídricos. La conservación de estos suelos también es importante para mantener la biodiversidad y los servicios ambientales que proporcionan, como el filtrado y la retención del agua.

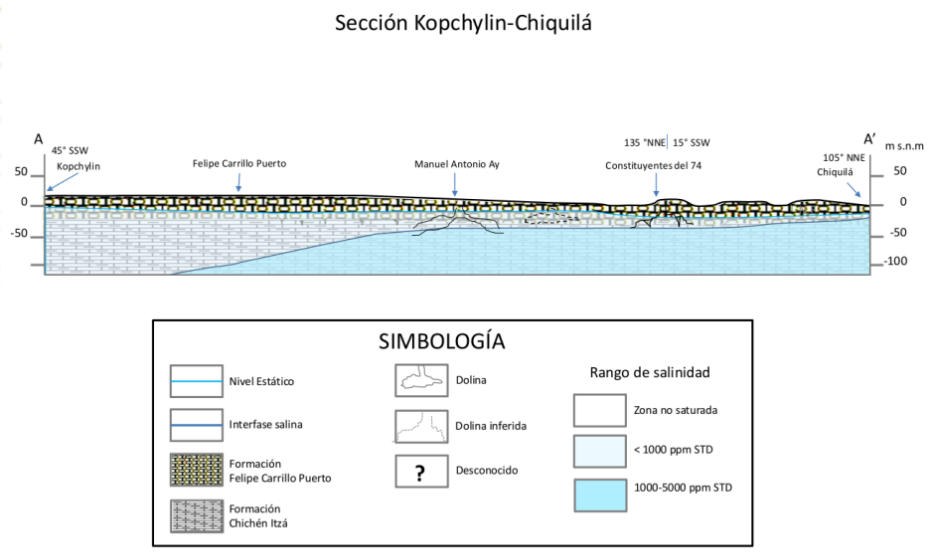
La erosión hídrica y la salinización son dos problemas ambientales comunes en muchas partes del mundo. La erosión hídrica ocurre cuando el agua de lluvia o de ríos arrastra la capa superior del suelo, llevándose consigo nutrientes y otros materiales esenciales para la supervivencia de las plantas y otros organismos del ecosistema. La salinización, por su parte, se produce cuando el agua de lluvia o de ríos se evapora, dejando atrás sales y otros minerales que pueden dañar el suelo y afectar a la producción agrícola.

Para conservar estos suelos y evitar la degradación de los ecosistemas, es importante implementar medidas de conservación del suelo, como la plantación de árboles y otras plantas que ayuden a mantener la capa vegetal del suelo y protejan contra la erosión, así como la implementación de técnicas de riego y drenaje adecuadas para evitar la salinización. También es importante promover prácticas agrícolas sostenibles que no dañen el suelo y aprovechen de manera eficiente sus recursos. La conservación de estos suelos es esencial para mantener la biodiversidad y los servicios ambientales que proporcionan, así como para garantizar la producción agrícola y la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro.

4.2.4. Hidrografía, cuencas y subcuencas

La División de Aguas Superficiales a nivel nacional consta de tres niveles de desagregación, el primero es la Región Hidrográfica, la cual combina por lo menos dos cuencas hidrográficas, cuyas aguas desembocan a un cauce principal. El segundo es la Cuenca Hidrográfica, delineada por una divisoria cuyas aguas fluyen hacia una corriente principal o cuerpo de agua. En tercer lugar, la Subcuenca Hidrográfica, área considerada como una subdivisión de la cuenca hidrográfica con características particulares de escorrentía y extensión.

Figura 10. Diagrama del acuífero en la zona norte de Quintana Roo

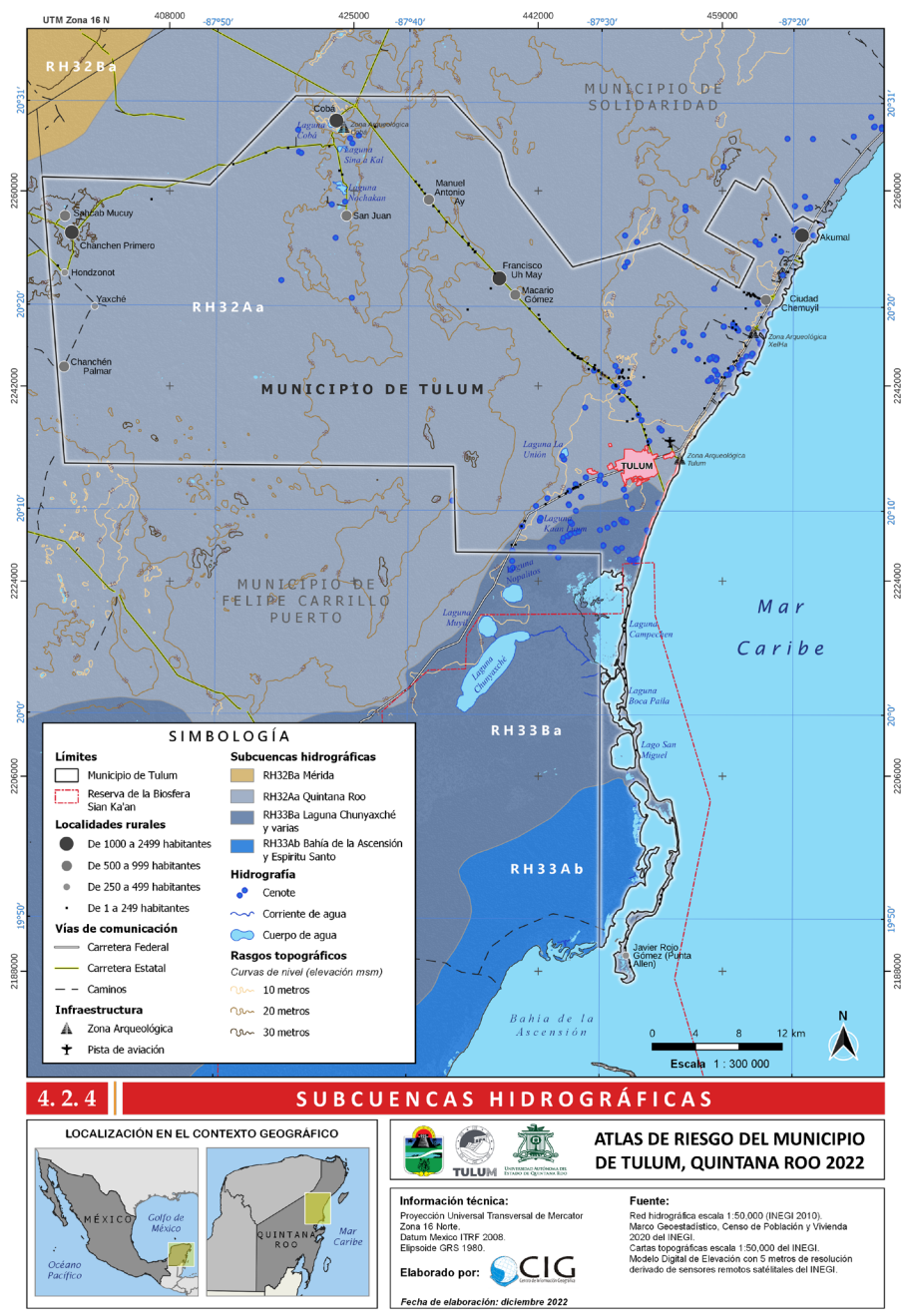


La sección es de tipo esquemático con el único fin de mostrar el modelo conceptual de las unidades acuíferas, no refleja datos estructurales, espesores reales o ángulos verdaderos de las unidades geológicas e hidrogeológicas representadas.

Fuente: Tomado de Emiliano Monroy-Ríos (https://sites.northwestern.edu/monroyrios/)

El municipio de Tulum esta dentro de dos Regiones Hidrográficas, la denominada Yucatán Norte (RH32) y la Yucatán Este (RH33), la primera de ellas ocupa el 93% (1,898.07 km2) de la superficie del municipio, la segunda el 7% restante al sureste.

Figura 11. Mapa de hidrología superficial y cuencas hidrográficas



Fuente: Elaboración propia.

La RH32 se caracteriza por tener una precipitación anual de 1,143 mm y por su orografía casi plana un escurrimiento natural medio superficial de 0 hm^3/año; mientas que la RH33 registra una precipitación anual de 1,210 mm y un escurrimiento natural medio superficial de 1,441 hm^3/año (Comisión Nacional del Agua, 2015).

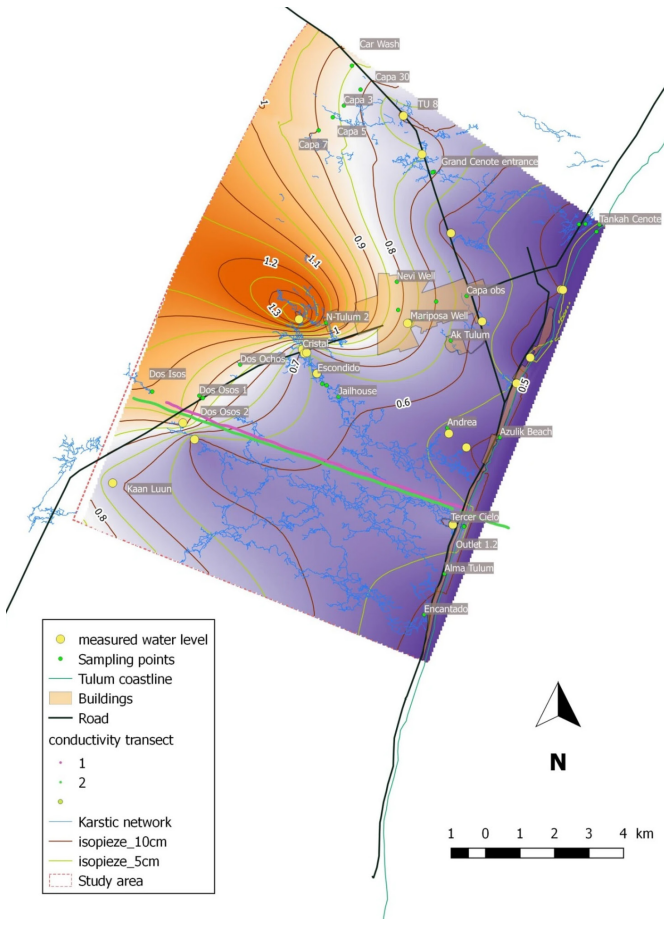
Por otra parte, derivado de la alta precipitación pluvial, la alta permeabilidad del terreno y la poca pendiente del mismo, la captación de agua por parte del subsuelo es muy alta. Lo anterior ocasiona que el acuífero

en la Península de Yucatán sea el más extenso de todo el país (124,409.1 km^2) con una recarga anual de 14,542.2 hm^3/año) de acuerdo con CONAGUA (2021).

Este acuífero es libre y con un espesor de la cuña hidráulica de 30 metros en promedio, aunque aumenta tierra dentro. Presenta un alto desarrollo kárstico con cenotes y dolinas de gran tamaño y alineados a debilidades estructurales (fallas y fracturas).

Es importante señalar que el municipio de Tulum presenta una alta densidad de cenotes y una profundidad al acuífero que no supera los 30 metros, disminuyendo hacía la costa. El nivel de saturación se mantiene menor a 5 metros en una franja costera de 10 a 40 km de ancho a partir de la costa (SEMARNAT, 2013). En la ciudad de Tulum el nivel de saturación del agua se encuentra a menos de 1.5 metros por debajo de la superficie como puede apreciarse en la figura 12.

Figura 12. Niveles piezométrico en la localidad de Tulum.



Fuente: Tomado de (Saint-Loup et al., 2018).

4.2.5. Cuerpos de agua

Los cuerpos de agua superficiales se identifican como lagunas, lagos, embalses, arroyos y cenotes, estos contienen importantes reservas de agua utilizable. En todo el municipio se encuentra presente la roca caliza (karst), la cual es altamente permeable, permitiendo que la mayor parte de la lluvia se infiltre al subsuelo (Schmitter-Soto et al., 2002). Es por ello que no existen cuerpos de agua y corrientes superficiales importantes, aunque sí varias lagunas y cenotes de importancia:

Tabla 7. Cuerpos de agua más representativos del municipio de Tulum.

Nombre	Ubicación	Uso predominante
Gran Cenote	A 3.8 km al noroeste de la ciudad de Tulum, sobre la carretera a Cobá	Recreativo, Turístico
Cenote Calavera	A 1.8 km al noroeste de la carretera federal 307, sobre la carretera a Cobá	Recreativo, Turístico
Cenote Car Wash	A 6 km al noroeste de la carretera federal 307, sobre la carretera a Cobá	Recreativo, Turístico
Cenote Cristal	A 6.5 km al sur de la localidad de Tulum sobre la carretera federal 307	Recreativo, Turístico
Cenote Zacil-Ha	A 8 km al noroeste de la carretera federal 307, sobre la carretera a Cobá	Recreativo, Turístico
Cenote Escondido	A 2.5 km al sur de la localidad de Tulum sobre la carretera federal 307	Recreativo, Turístico
Laguna La Unión	Latitud: 20° 13’ 11” norte, Longitud: 87° 31’ 55” oeste. Acceso por caminos comunales al oeste de la ciudad de Tulum	Recreativo, Recarga
Laguna Nochakan	A 5.5 km al sur de la localidad de Cobá, sobre la carretera Nuevo Progreso - Cobá	Recreativo, Recarga
Laguna Sina Akal	A 2.5 km al sur de la localidad de Cobá, sobre la carretera Nuevo Progreso - Cobá	Recarga
Laguna Macanxoc	A 500 metros al este de la localidad de Cobá	Recreativo, Turístico
Laguna Coba	En la localidad de Cobá	Recreativo, Turístico
Laguna Boca Paila	Laguna costera de agua salobre situada a 26 kilómetros al sur de la ciudad de Tulum, sobre la carretera costera Tulum - Punta Allen	Recreativo, Turístico, Pesca
Laguna Caapechen	Laguna costera, de agua salobre situada a 15 kilómetros al sur de la ciudad de Tulum, sobre la carretera costera Tulum - Punta Allen	Recreativo, Turístico, Pesca
Laguna Kaan Luum	A 10 km al sur de la localidad de Tulum sobre la carretera federal 307	Recreativo, Turístico

Fuente: Elaboración propia.

Por medio de fotointerpretación y digitalización de imágenes de satélite de alta resolución y mapas, se ha logrado identificar 52 cenotes dentro de la geografía del municipio. La mayor parte de ellos (46) cercanos a la ciudad de Tulum y la carretera federal 307, los restantes están cercanos a la localidad de Cobá.

4.2.6. Corrientes de agua.

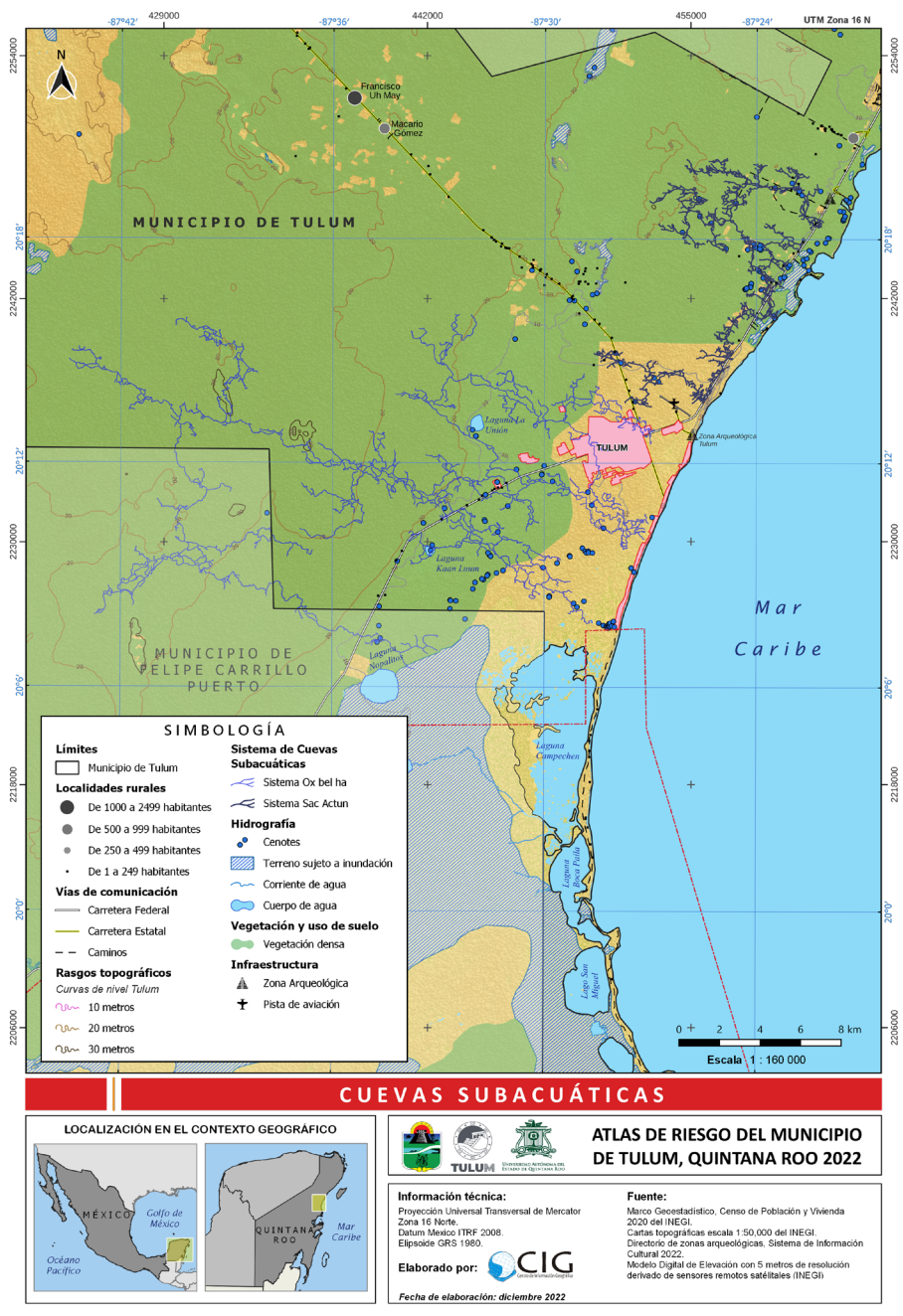
Como la gran mayoría del territorio la Península de Yucatán, el territorio del municipio de Tulum es prácticamente plano, sin relieve notable y constituido por una planicie kárstica que no retiene las corrientes superficiales, por lo que la hidrografía está constituida únicamente por algunas lagunas pequeñas y los cenotes, que son afloramientos superficiales de ríos subterráneos.

Por otra parte, las corrientes subterráneas identificadas, se localizan al este el municipio en varios sistemas de cuevas entre otros: Sac Actun, Sistema Ox Bel, Aktun-Ha y demás sistemas de menor extensión que se encuentran principalmente debajo de los cenotes. Las direcciones de flujo observadas tienen su escurrimiento de noroeste-sureste.

4.2.7. Dolinas

Antes se ha señalado que el municipio de Tulum tiene un relieve kárstico (endokarst y el exokarst). Cuando la disolución se lleva a cabo en el subsuelo las formas encontradas se llaman endokársticas, como las cuevas y los espeleotemas (estalactitas, estalagmitas, etc.) que se forman dentro de ellas y de las cuales se han mencionado en el apartado anterior los principales sistemas cartografiados hasta la fecha.

Figura 13. Mapa de corrientes subterráneas



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el relieve kárstico superficial (exokarst) está conformado por las dolinas (del eslavo “dolineque”) que significa depresión y su

equivalente en maya son los cenotes, siempre que contengan agua. Sin embargo, los cenotes en este municipio casi siempre contienen agua al estar el nivel freático cerca de la superficie topográfica. Como las rocas carbonatadas son muy solubles, el agua de lluvia en lugar de fluir como río, se infiltra completamente en el subsuelo hasta encontrar una barrera que ya no la deja pasar, y se acumula a partir de ese momento: El nivel freático es el límite superior de esta acumulación de agua.

Las dolinas son depresiones cerradas, que pueden medir desde algunos metros hasta un kilómetro de diámetro. Se establecen donde convergen varias fracturas, y muchas veces están cubiertas de suelo que impide identificarlas, a menos que haya cortes en el terreno, como en las carreteras. Su formación es variada, a partir de la solubilidad de la roca, la cantidad de agua que pase por ella y sus conexiones con alguna cavidad que reciba los elementos disueltos.

A través de los procesos anteriores la roca se va disolviendo y ensanchando, posteriormente los techos colapsan por gravedad y se forma una oquedad conocida como cenote (del maya dzonoot: “hoyo con agua”) si es que esa oquedad esta inundada. Existen varios tipos de cenotes: a cielo abierto, semiabiertos y subterráneos o en gruta, aunque puedan parecer lagos pequeños, usualmente son cilíndricos y más profundos que amplios. Con frecuencia los cenotes tienen conexión hidráulica entre sí, a través de cuevas y galerías subterráneas, que en muchos casos tienen salida directa al mar. (Schmitter-Soto, et al., 2002). Si el colapso de una dolina permite la entrada a un sistema subterráneo de cuevas, entonces lleva el nombre de “ventana kárstica”.

Uno de estos sistemas es el Sistema de cavernas Sac Actun, uno de los más grandes del planeta y del que hasta ahora se han cartografiado 347 kilómetros de cavidades interconectadas aunque algunos expertos señalan que podrían ser hasta 1,000 kilómetros (Guillermo de Anda, 2018). A este sistema pertenecen los cenotes Dos Ojos, Nohoch Nah chich, Muul-Ha, Nohoch Kin, Calavera, entre otros.

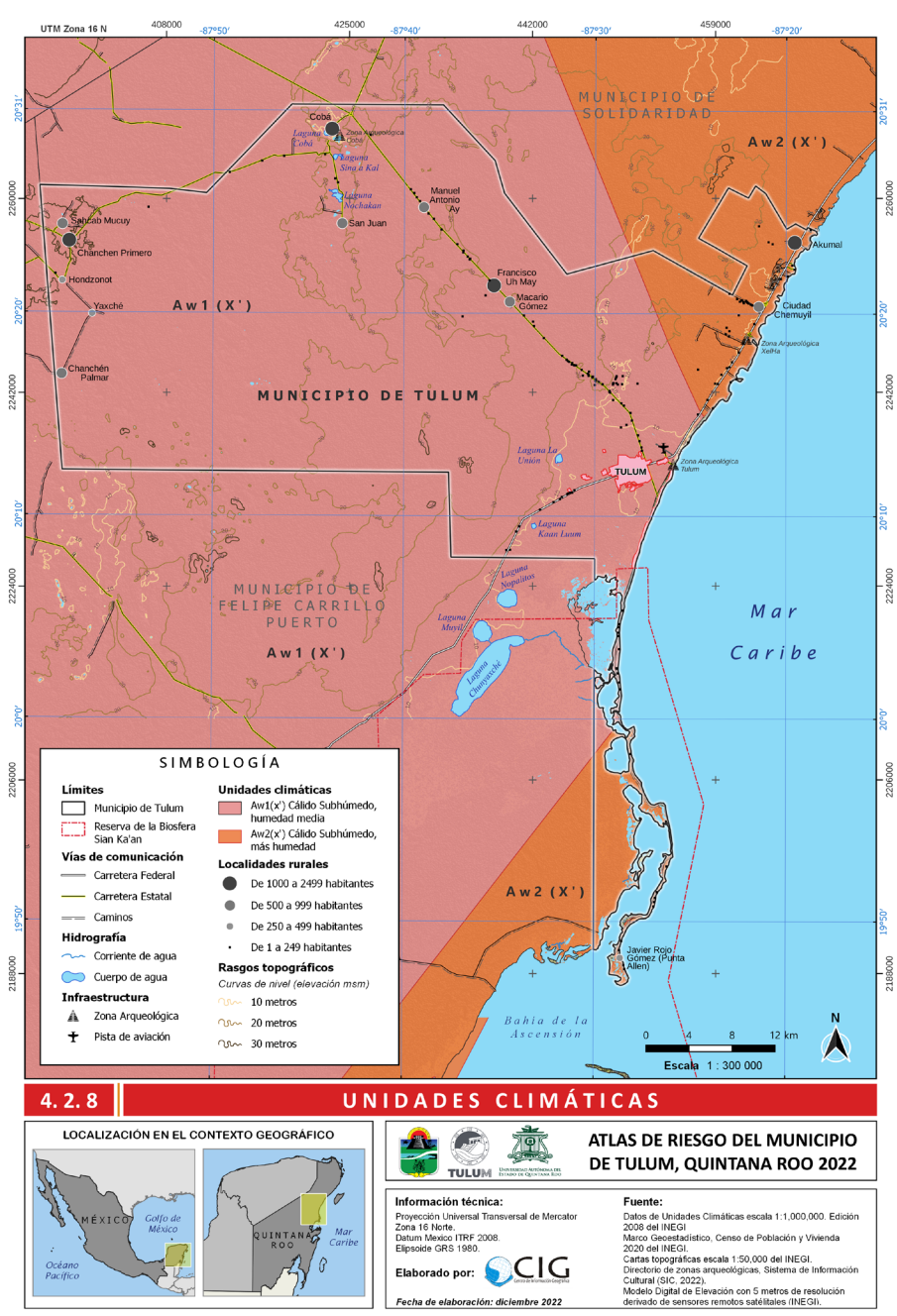
4.2.8. Clima

El clima es el tiempo atmosférico en un lugar determinado durante un período de tiempo prolongado. Puede incluir factores como la temperatura, la humedad, la precipitación, el viento y la presión atmosférica. Es producto de las interacciones atmosféricas y los océanos, y se define con la medición, por más de tres décadas, de variables como la lluvia, la humedad y el viento entre otras.

El clima se clasifica por regiones con características similares que se relacionan estrechamente con la distribución de la flora, la fauna y los recursos naturales. Existen diferentes formas de clasificar el clima, una de las más comunes es la clasificación de Köppen, que divide el clima en cinco grandes grupos: clima tropical, clima templado, clima mediterráneo, clima continental y clima polar. Dentro de cada uno de estos grupos, se pueden distinguir diferentes subtipos de clima en función de las características específicas de cada lugar.

Enriqueta García (1964) adaptó para las condiciones de México la clasificación mundial de Wilhelm Köppen. Este es el sistema de clasificación utilizado de manera oficial en México. En la Península de Yucatán solo se presentan dos tipos de clima, el seco estepario en la costa noroeste (BS) y el cálido subhúmedo en el resto (Aw).

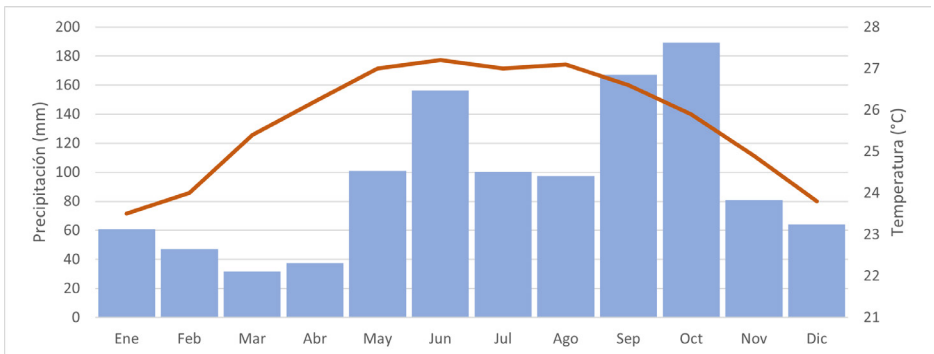
Figura 14. Climas en el municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Esto se debe a su posición geográfica rodeada por mares, su cercanía al Trópico de Cáncer y su orografía casi plana; esto ocasiona que exista un gradiente de precipitación de la parte norte más seca hacia al sur con mayor precipitación. El municipio de Tulum presenta un tipo de clima Cálido Subhúmedo [Aw1(x’)] con una temperatura del mes más frío mayor de 18º C, temperatura promedio anual mayor de 22º C, lluvias en verano y alto porcentaje de lluvia invernal (10.2%). La menor cantidad de días con lluvia es durante el mes de abril (3.2 días), mientras que el mes más lluvioso es septiembre (12.8 días). Este clima es propicio para el desarrollo de la selva mediana subcaducifolia.

Figura 15. Climograma de la estación meteorológica en la localidad de Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Variación anual de temperatura y clima en Tulum.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media	23.5	24	25.4	26.2	27	27.2	27	27.1	26.6	25.9	24.9	23.8
Temperatura máxima	29.3	29.8	30.9	31.4	32.2	32	32.3	32.4	31.8	31.2	30.5	29.4
Temperatura mínima	17.8	18.2	19.8	21.1	21.8	22.5	21.7	21.7	21.4	20.6	19.4	18.2
Precipitaciones	60.7	47	31.7	37.6	100.9	156.5	100.4	97.3	167.2	189.2	80.8	64.2

Fuente: Elaboración propia.

La época más cálida del año en Tulum es de junio a septiembre, cuando también es común experimentar lluvias frecuentes. Sin embargo, el clima generalmente soleado durante todo el año lo que lo ha convertido en un destino popular entre los turistas.

4.2.9. Precipitación

Tulum tiene una precipitación anual de entre 1,200 a 1,500 mm, el mes más seco es marzo, con una precipitación promedio mensual de 31.7 mm; y el más lluvioso es octubre con un promedio de precipitación de 189.2 mm.

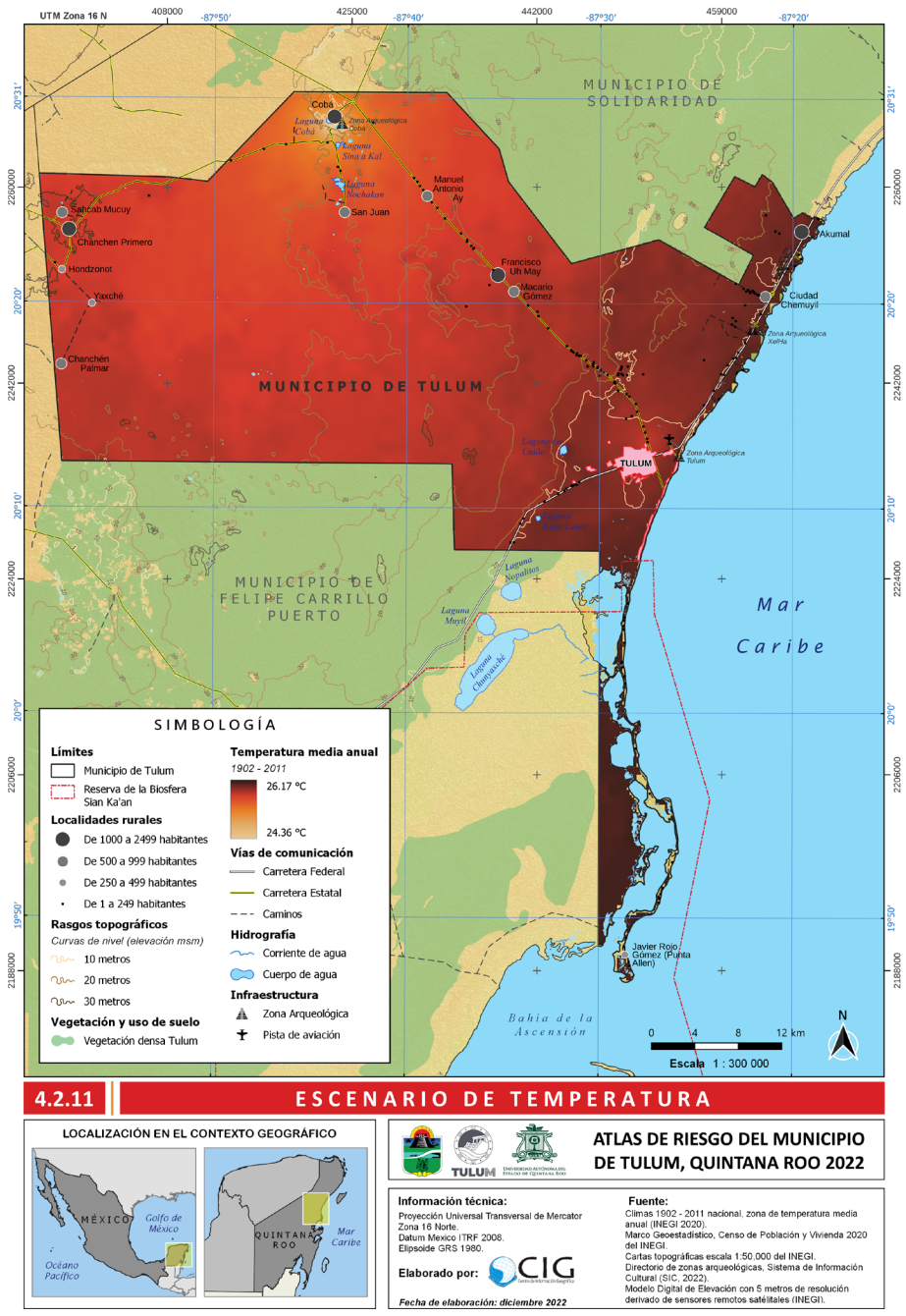
4.2.10. Escenarios climáticos

A continuación se presenta el escenario de condiciones climáticas para el municipio de Tulum, basado en el Atlas de escenarios de Cambio Climático para la Península de Yucatán, del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Dentro de este Atlas se utilizaron 4 modelos atmosféricos, combinados cada uno con 4 escenarios de emisiones. Para el Atlas de Riesgo de Tulum se ha seleccionado la combinación que se adecua mejor a la dinámica regional (modelo HADCM3), desarrollado por el laboratorio Hadley Centre, en Inglaterra. Este modelo considera 19 capas de información atmosférica y 19 capas de información oceanográfica.

El escenario de emisiones seleccionado es el A2 que establece una tasa de emisiones de gases de invernadero muy parecidas a las actuales. Este escenario toma en cuenta el crecimiento continuo de la población, sin embargo, el crecimiento económico se proyecta fragmentado por regiones y más lento que los otros tres escenarios usados en ese Atlas.

De acuerdo con este modelo, la temperatura promedio anual tiene una gradiente espacial desde el noroeste del municipio (25.42 °C) hacia la costa suroriental (25.98 °C) donde se encuentra la localidad de Punta Allen.

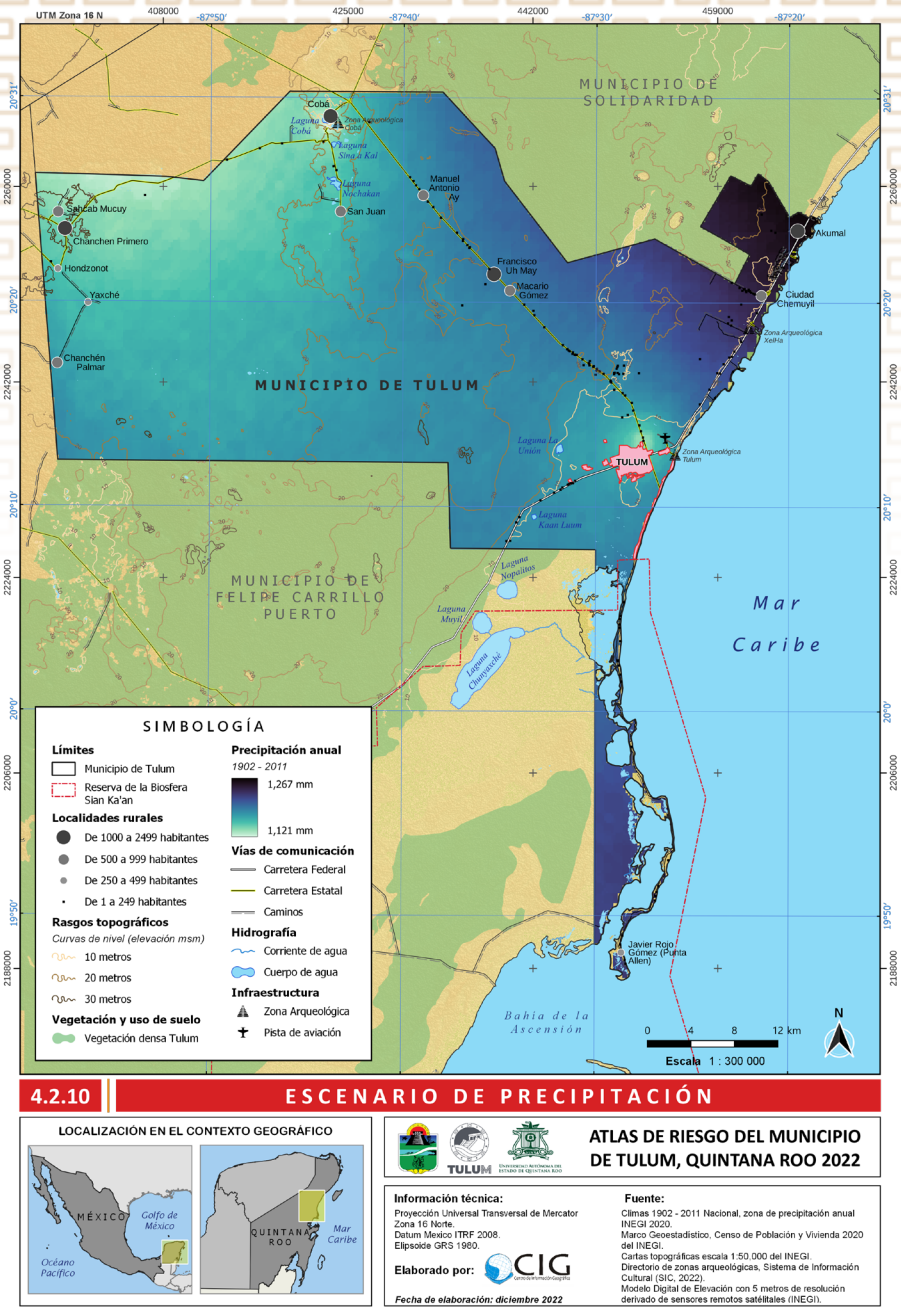
Figura 16. Mapa de escenario de temperatura del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Del mismo escenario (HADCM3A21) los datos de precipitación señalan un rango espacial de precipitación promedio anual de 1,140 a 1.216 mm, teniendo en el sur del municipio la zona con mayor precipitación y la zona de menor precipitación es la costa este.

Figura 17. Mapa de escenario de precipitación del municipio de Tulum



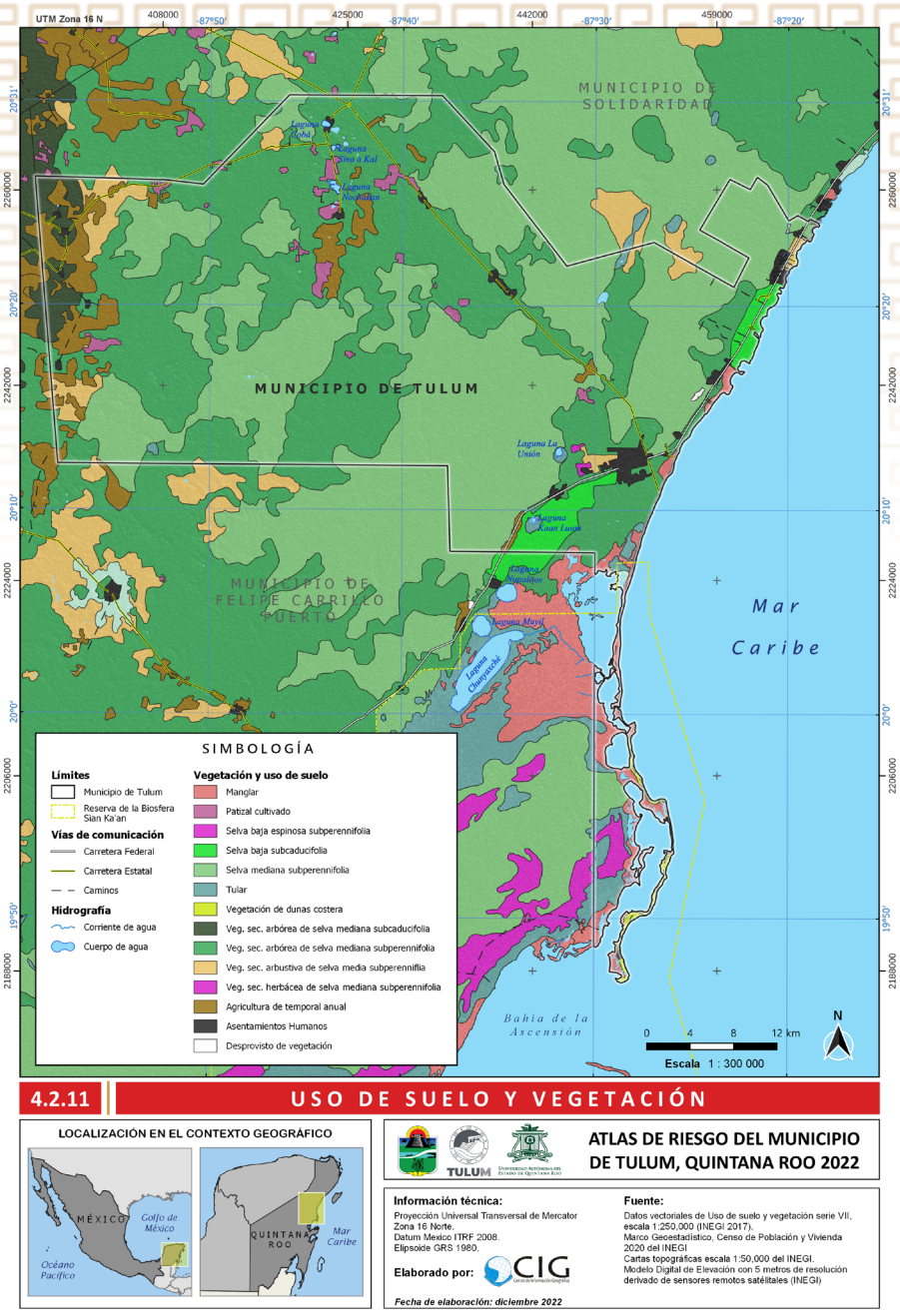
Fuente: Elaboración propia.

Este escenario presenta una modificación en ambas variables climáticas con respecto a los datos históricos recabados por la estación meteorológica de la CONAGUA, ubicada en la ciudad de Tulum. Dicha estación registra una temperatura promedio de 25.7 y una precipitación anual de 1,615.4 mm durante un periodo de 35 años. Si comparamos con los datos del escenario anterior vemos un aumento en la temperatura y una disminución en la precipitación, lo que indica que la tendencia del cambio global en el clima ya tiene repercusiones en la geografía del municipio.

4.2.10.1. Uso de suelo y vegetación

Las asociaciones vegetales en la Península de Yucatán se tornan cada vez más diversas en relación con el gradiente de humedad que incrementa de norte a sur. La vegetación típica del municipio de Tulum es la selva tropical húmeda, con una gran variedad de especies de flora. Respecto del uso del suelo, éste ha sido históricamente agrícola y de silvicultura, debido a la fertilidad del suelo y la presencia de agua en la zona. Sin embargo, en los últimos años ha habido un gran aumento en el turismo, lo que ha llevado a una mayor urbanización y desarrollo residencial, aun así, el porcentaje de suelo urbanizado es del 2% de acuerdo con la Serie VII de Usos de Suelo y Vegetación del INEGI.

Figura 18. Vegetación y Usos de suelo en Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en la tabla 9 la asociación vegetal que ocupa la mayor superficie del municipio corresponde a la vegetación secundaria de selva mediana. Esta vegetación secundaria está presente en aquellas superficies en las cuales la vegetación primaria es eliminada o alterada por diversos factores, ya sea naturales o antrópicos. El desarrollo natural de la vegetación secundaria la lleva a estar en diferentes fases sucesionales, tales como la arbórea, arbustiva y herbácea.

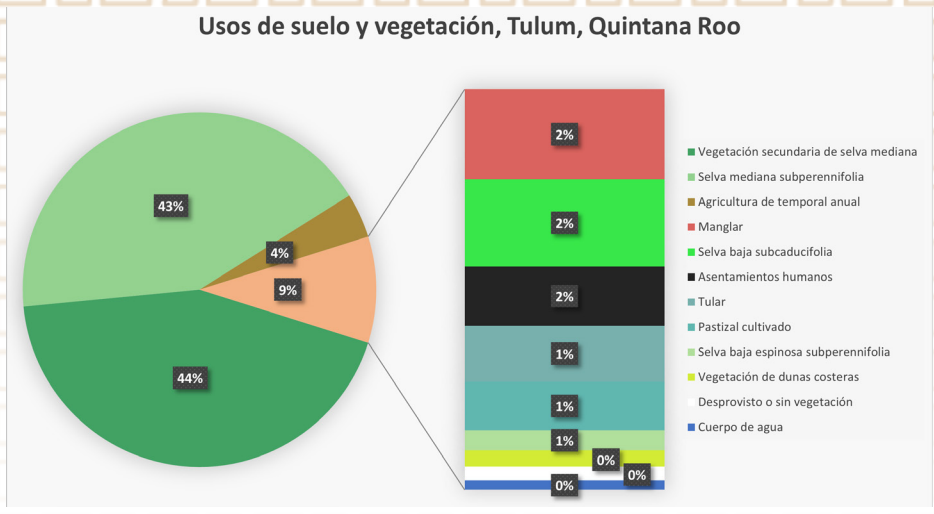
Tabla 9. Distribución de tipos de vegetación y usos de suelo en Tulum.

Descripción	Superficie (km²)	Porcentaje
Vegetación secundaria de selva mediana	890.56	44%
Selva mediana subperennifolia	869.50	43%
Agricultura de temporal anual	83.13	4%
Manglar	44.30	2%
Selva baja subcaducifolia	43.23	2%
Asentamientos humanos	29.11	1%
Tular	27.63	1%
Pastizal cultivado	24.00	1%
Selva baja espinosa subperennifolia	10.00	0%
Vegetación de dunas costeras	7.90	0%
Desprovisto o sin vegetación	6.81	0%
Cuerpo de agua	4.77	0%
	2,040.94	**100%**

Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía vectorial de la Serie VII de la capa de Vegetación y Uso de suelo del INEGI (2016).

En relación con la vegetación natural del municipio, ésta es la de selva mediana subperennifolia, misma que se presenta en las regiones con climas cálido-húmedos con precipitaciones de más de 1,000 hasta 1,300 mm anuales y sequías estacionales a mitad de año. Las especies importantes de esta asociación vegetal son la *Swietenia macrophylla* (Caoba), *Manikara zapota* (Zapote), *Bucida buceras* (Pucte), *Metopium brownei* (Chechen), *Brosimun alicastrum* (Ramon), *Bursera simaruba* (Chaka), *Cedrela odorata* (Cedro rojo), entre otras.

Figura 19. Distribución de la vegetación y uso de suelo en Tulum.



Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía vectorial de la Serie VII de la capa de Vegetación y Uso de Suelo del INEGI (2016).

Aunque superficie de las zonas urbanas no llega a ocupar el 2% del municipio, el territorio es objeto de una fuerte presión de desarrollo inmobiliario, por su principal actividad productiva, el turismo, por lo que deberán atenderse las condicionantes del territorio de tal forma que solo se urbanicen las áreas con aptitudes y se preserven las áreas que representan un riesgo y las que por su valor medio ambiental deban permanecer prístinas.

4.2.11. Áreas Naturales Protegidas

Las Áreas Naturales Protegidas son los mecanismos de ordenamiento territorial que han resultado más efectivos para conservar los ecosistemas, permitir el desarrollo de la biodiversidad y combatir los efectos del cambio climático. En México son aquellas zonas del territorio nacional en donde los ambientes originales no se han alterado notablemente por la actividad antrópica o aquellos territorios que requieren ser conservados y/o restaurados por su importancia ecológica (SEMARNAT, 1987).

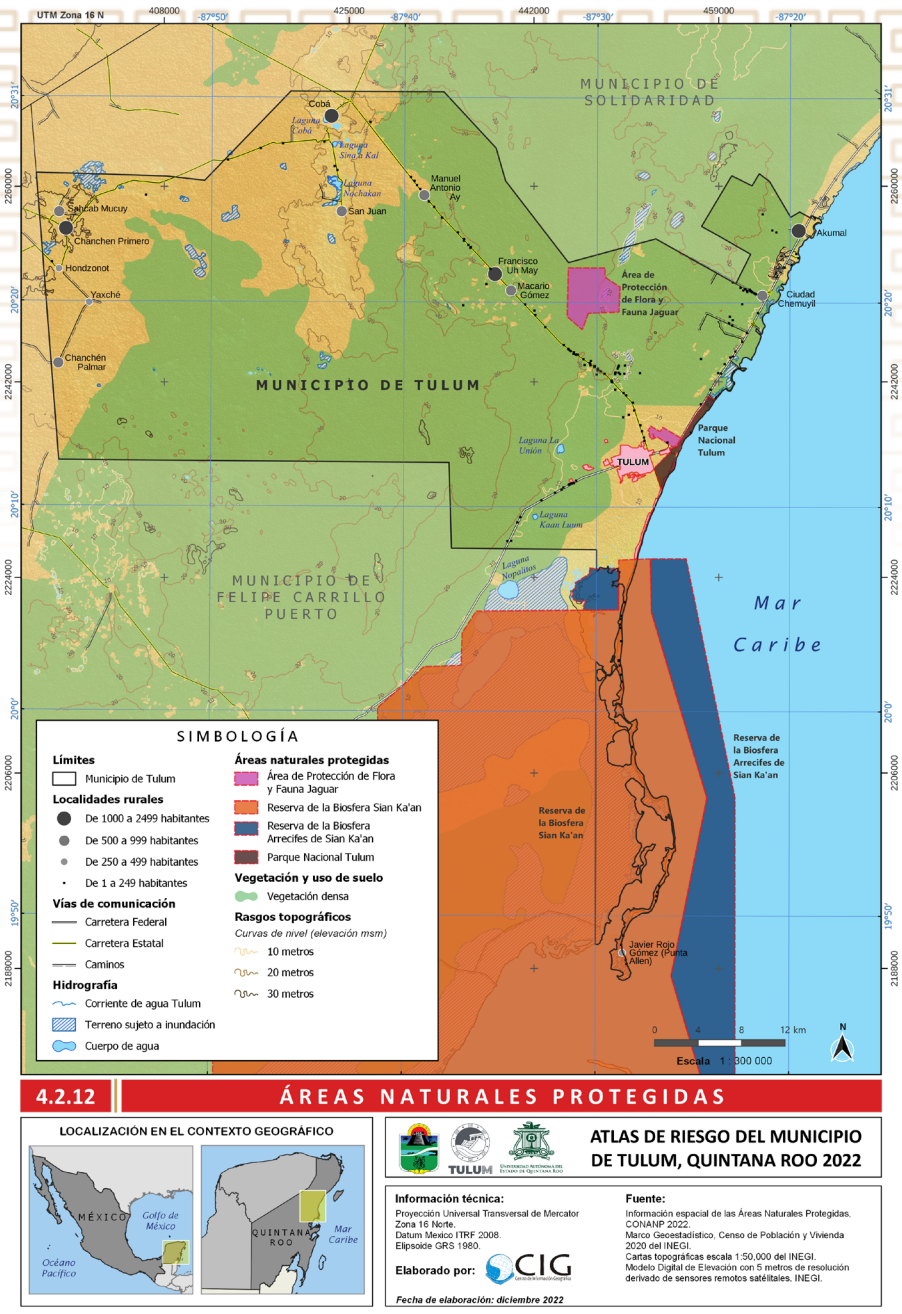
Dentro del municipio de Tulum se encuentran 4 áreas naturales protegidas, 2 de ellas están completamente en el interior del polígono municipal y las otras dos se encuentran de manera parcial al interior. Las Áreas Naturales Protegidas dentro del municipio son el *Parque Nacional de Tulum* y el *Área de Protección de Flora y Fauna Jaguar*. Por su parte, la *Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an* cubre una superficie de 87.77 km² y la *Reserva de la Biósfera Arrecifes de Tulum* una superficie de 0.04 km^2, ambas al sur del municipio.

Tabla 10. Áreas Naturales Protegidas y sus superficies en Tulum.

Nombre	Categoría de manejo	Decreto de creación	Superficie (km2)	Porcentaje de la superficie municipal
Tulum	Parque nacional	23/04/1981	0.6643213	0.03%
Arrecifes de Sian Ka'an	Reserva de la Biósfera	02/02/1998	0.048249622	0.00%
Sian Ka'an	Reserva de la Biósfera	20/01/1986	8.777123564	0.43%
Jaguar	Área de protección de flora y fauna	27/07/2022	2.24971043	0.11%

Fuente: Elaboración propia a partir de la cartografía digital de las ANP de CONABIO (2016)

Figura 20. Áreas naturales protegidas en Tulum



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Caracterización de los elementos sociales, económicos y demográficos

4.3.1. Dinámica demográfica

Para los próximos años en Latinoamérica y el Caribe se prevé un crecimiento poblacional moderado que ocurrirá en medio de grandes cambios entre el crecimiento económico, la disminución de la pobreza, y el esfuerzo por disminuir desigualdades existentes entre la población de mayores y menores ingresos (UN/ISDR, 2012). Los cambios en la distribución espacial de la población implicarán un desafío de políticas, por lo que es necesario prever servicios adecuados para esta creciente población urbana, teniendo en cuenta que dicho crecimiento debe orientarse en el marco de un desarrollo sustentable, minimizando los impactos ambientales.

Uno de los temas importantes de la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD) es el conocimiento y la explicación de las cargas de población, y la comparación de las densidades en función de los modos de vida y de los elementos que ofrece el medio natural. El conocimiento detallado de la situación de la población constituye, por lo tanto, un insumo esencial para el diseño de estrategias correctivas y de respuestas rápidas. Más aún, el análisis demográfico, el cual aporta la comprensión de los factores de la dinámica demográfica su incidencia sobre los cambios poblacionales, y los mecanismos que permitirían modificar o al menos moderar la evolución demográfica. Este conocimiento permite, por un lado, construir escenarios futuros que permitan anticipar los niveles de exposición, en consecuencia, orientar las políticas y planes de ordenamiento territorial para mitigar el riesgo.

Por lo tanto, se debe conocer los cambios en la dinámica demográfica de las regiones y ciudades, ya que el crecimiento de la población y sus actividades han sido ampliamente reconocido como uno de los factores globales que inciden en el aumento de vulnerabilidad a desastres y es un elemento importante en el tratamiento y análisis de la configuración del riesgo.

En este apartado se muestra la composición de la población del municipio de Tulum y sus principales ciudades.

4.3.1.1. Análisis comparativos

De acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), levantado en 2020, la población total del municipio de Tulum para ese año fue de 46,721 habitantes, la mayor parte (71%) se concentra en la ciudad de Tulum, la capital municipal con 33, 374 habitantes.

La población total del municipio representa el 2.5% del Estado de Quintana Roo. El tamaño promedio de los hogares del municipio es de 3.33 integrantes. En consideración a su superficie, el municipio representa una densidad poblacional de 23 habitantes por km2. El 84.4% de la población se concentra en cinco localidades, Tulum, Akumal, Cobá, Francisco Uh May y Chanchén Primero. En la tabla 11 se muestran los principales indicadores poblacionales para el municipio de Tulum de acuerdos a los datos del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.

Tabla 11. Distribución de la población del municipio de Tulum 2020.

Variable	Total	Porcentaje
Población total	46, 721	100%
Hombres	24, 390	52.2%
Mujeres	22, 331	47.8%
Relación hombres-mujeres	109.22	-
Población de 0 a 14 años	13, 269	28.66%
Población 15 a 64 años	32, 093	68.69%
Población de 65 años y más	1, 295	2.77%
Edad mediana1	26	-
Índice de envejecimiento2	-	16.74%
Razón de dependencia3	-	45.38%

Notas: [1]Esta medida divide la distribución por edades de una población determinada en dos grupos numéricamente iguales; la mitad de los casos quedan por debajo de la mediana y la otra mitad por encima. Para su cálculo se excluye a la población con edad no especificada.
[2]El índice de envejecimiento es la relación de la población de 60 años y más de edad, entre la población de 0 a 14 años, cuyo resultado generalmente se expresa por cien.
[3]La razón de dependencia es un cociente de la población de 0 a 14 años más la de 65 años y más entre la población de 15 a 64 años multiplicado por cien.

Tabla 12. Población en localidades de 1 y 2 viviendas.

Localidades de una vivienda	334	136
Localidades de dos viviendas	94	43

Fuente: INEGI (2020). Principales resultados por localidad (ITER).

Se entiende por localidad, de acuerdo con el INEGI (2020), "todo lugar ocupado con una o más viviendas, las cuales pueden estar o no habitadas; este lugar es reconocido por un nombre dado por la ley o la costumbre". De la misma manera, el INEGI define a localidades rurales y localidades urbanas por el número de habitantes de una localidad, lo cual determina si es rural o urbana. De acuerdo con el INEGI, una población se considera rural cuando tiene menos de 2,500 habitantes, mientras que la urbana es aquella donde viven más de 2,500 personas.

A partir de la definición anterior el municipio de Tulum solo cuenta con 1 localidad urbana y el resto se consideran rurales (176). La población del municipio de Tulum se distribuye de la siguiente manera (tabla 14).

Tabla 14. Población total y población total por porcentaje.

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL (habitantes)	PORCENTAJE DEL TOTAL MUNICIPAL (%)
Tulum	33,374	71.43
Akumal	2,154	4.61
Cobá	1,738	3.72
Francisco Uh May	1,288	2.76
Chanchén Primero	1,078	2.31
Macario Gómez	884	1.0
San Juan	770	1.65
Manuel Antonio Ay	621	1.33
Chanchén Palmar	597	1.28
Sahcab Mucuy	596	1.28
Ciudad Chemuyil	548	1.17
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	0.84
Hondzonot	391	0.84
Yaxché	367	0.79
Cristal [Colonia]	352	0.75
San Pedro	136	0.29
Chan Chemuyil	127	0.27
Jacinto Pat	100	0.21
La Unión	74	0.16
Tankah Tres	62	0.13
La Unión	62	0.13
Bahías de Punta Solimán	56	0.12

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL (habitantes)	PORCENTAJE DEL TOTAL MUNICIPAL (%)
La Ceiba	45	0.1
Kilómetro Doce	40	0.09
Marités	36	0.08
El Pequeño Paraíso	34	0.07
Don Brígido	33	0.07
Dos Palmas	32	0.07
Gran Bahía Príncipe	29	0.06
India Blanca	26	0.06
Árboles Tulum	20	0.04
India Blanca	19	0.04
Las Dos Hermanas	18	0.04
Tres Hermanos	18	0.04
Alfa y Mega	16	0.03
San Nazarén	16	0.03
Punta Sur	16	0.03
Akumal Sur	15	0.03
Aventuras Akumal	15	0.03
Cafeto Cimarrón	15	0.03
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	0.03
Tres Vírgenes	14	0.03
Océano Azul	12	0.03
Balam Luum	11	0.02
El Cedro	11	0.02
Yolis	10	0.02
Koox Campestre	9	0.02
Morales [Rancho]	9	0.02
Santa María	9	0.02
Paraíso [Rancho]	9	0.02
Cachito de Cielo	9	0.02
Lum Ha [Lotes]	9	0.02
San José	8	0.02
Ek Che	7	0.02
Tankah Cuatro	7	0.02
Cenote Calavera	7	0.02
Noh Aaktun	7	0.02
El Palomar	7	0.02
Vivero Jardín	7	0.02
Chonita	7	0.02
Ixchel [Rancho]	7	0.02
Cayetano Nieto Colín	6	0.01
El Lagunero	6	0.01
Kirabo	6	0.01
El Venado	6	0.01
Yalkú	6	0.01
La Casa de las Mariposas	6	0.01
Las Dos Luces	6	0.01
San Antonio	6	0.01
Tulum Monkey Santuary (TMS)	6	0.01
Dylan Chimal Herrera	6	0.01
Valle de Barak	6	0.01
Balam Canché	5	0.01
Kaakulxa	5	0.01
San Felipe	5	0.01
San Miguel	5	0.01
Ninguno	5	0.01
Tres Nietos (Don Lupe)	5	0.01
Doña Martina [Vivienda]	5	0.01
Yax'muul [Rancho]	5	0.01
Cobá [Hacienda]	5	0.01
Inlakech	5	0.01
Nooch [Cenote]	5	0.01
Casa Nalum	4	0.01
Playa Manatí	4	0.01
Kaape Ha	4	0.01
Casa Amparo	4	0.01
Los Gatos Negros	4	0.01
Casa de los Pelícanos	4	0.01
Las Amarantas	4	0.01
Camino Maya	4	0.01
Sac-Be	4	0.01
El Lince	4	0.01
Harumi Fandiño Sakane	4	0.01
Najil'kaax [Rancho]	4	0.01
Akunynam	4	0.01
Paraíso	4	0.01
Machete [Rancho]	4	0.01
El Tigre [Rancho]	4	0.01
El Palancar	3	0.01
Boca Paila	3	0.01
La Esperanza	3	0.01
El Paraíso	3	0.01
Pedro Paila	3	0.01
San Juan	3	0.01
Antonio Pool	3	0.01
Cenote Zazil-Ha	3	0.01
Nubia Aracely González López	3	0.01
Kilómetro Seis	3	0.01
The Jungle Place	3	0.01
Casa Tzalam	3	0.01
Silvia Canché	3	0.01
Mauricio [Rancho]	3	0.01
Las Cabañas	2	0.004
Casa del Sol	2	0.004
Doña Leonor	2	0.004
EA	2	0.004
Houston	2	0.004
Jorge Portilla Manica	2	0.004
Lol Beh	2	0.004
Pesca Maya	2	0.004
La Nueva Esperanza	2	0.004
San Mateo	2	0.004
SEMARNAT	2	0.004
La Teresita	2	0.004
Xbecal	2	0.004
La Culebra	2	0.004
Mucuy [Rancho]	2	0.004
Loma Linda	2	0.004
El Pedregal	2	0.004
The Smilling Iguana	2	0.004
Ninguno [Vivero]	2	0.004
Alux	2	0.004
Casa Celeste	2	0.004
Efraín Cen	2	0.004
Yum' Kíim	2	0.004
Tho [Cenote]	2	0.004
Casa Indi	2	0.004
Mi Amigo Faisán [Restaurante]	2	0.004
Xcacel [Residencial]	2	0.004
Casa Wom	2	0.004
Caleta Tankah	1	0.002
Chan Ha	1	0.002
Crucero de las Ruinas de Tulum	1	0.002
El Campesino	1	0.002
María Magdalena	1	0.002
Rancho Mariposa	1	0.002
San José	1	0.002
Sol Caribe	1	0.002
Sol Maya	1	0.002
Don Renzo	1	0.002
El Teterete	1	0.002
Áaktun Ha	1	0.002
El Álamo	1	0.002
Aluxes	1	0.002
Yakunah	1	0.002
La Pescadora	1	0.002
Alejandro Terrazas	1	0.002
San Manuel	1	0.002
Santo Domingo	1	0.002
Ranitas [Vivero]	1	0.002
Balam Ak'ab	1	0.002
Eleazar Pool [Vivienda]	1	0.002
Treinta y Uno [Lote]	1	0.002
Manuel Chivero	1	0.002
Pueblito Chemuyil	1	0.002
Dreams Tulum [Poblado de Apoyo del Hotel]	1	0.002
Número Siete	1	0.002
Canbalan [Rancho]	1	0.002
Pakchen [Rancho]	1	0.002
La Picuda	1	0.002
Rancho Antigua	1	0.002
Dzidzilché [Villa]	1	0.002
Villa Dzidzilché	1	0.002
Cobá [Rancho]	1	0.002
Pacha Mamá	1	0.002
San Pablo	1	0.002
Total del municipio	**46,721**	**1**

Fuente: INEGI (2020). Principales resultados por localidad (ITER).

4.3.1.2. Proyección al 2020-2030-2050

De acuerdo con los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020 del INEGI, se realizó el cálculo de proyección de la población del municipio de Tulum (tabla 15). Así como el procesamiento de datos para obtener la tasa de crecimiento proyectada a 2050 (tabla 16).

Tabla 15. Proyección de la población municipal

Municipio de Tulum	Población Total		
	2020	2030	2050
	46, 721	127,673	348,889

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INEGI (2020). Principales resultados por localidad (ITER).

Tabla 16. Tasa de crecimiento de la población municipal

Municipio de Tulum	Tasa de crecimiento medio anual de población		
	2000-2010	2010-2020	2020-2050
	7.48	5.15	5.15

Nota: El método empleado para el cálculo de la tasa de crecimiento se determinó con la Tasa de Crecimiento Geométrico.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INEGI (2020). Principales resultados por localidad (ITER).

Las proyecciones demográficas constituyen dentro del proceso de planeamiento un ejercicio obligado e imprescindible, toda vez que es preciso disponer de una estimación de la población futura para poder dimensionar adecuadamente las necesidades, en primer lugar, de suelo para viviendas, actividades económicas y equipamiento debidas a la evolución previsible de dicha población. Y en segundo para poder estimar la población que puede verse afectada en caso de que se presente una amenaza natural. Por lo que se emplea un método analítico aritmético para su cálculo a partir de los datos 2020 (INEGI, 2020) (tabla 17).

Tabla 17. Proyección de la población por localidad

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL (habitantes)	POBLACIÓN A 2030 (habitantes)	POBLACIÓN A 2050 (habitantes)
Tulum	33,374	91,200	249,220
Akumal	2,154	5,886	16,085
Cobá	1,738	4,749	12,979
Francisco Uh May	1,288	3,520	9,618
Chanchen Primero	1,078	2,946	8,050
Macario Gómez	884	2,416	6,601
San Juan	770	2,104	5,750
Manuel Antonio Ay	621	1,697	4,637
Chanchén Palmar	597	1,631	4,458
Sahcab Mucuy	596	1,629	4,451
Ciudad Chemuyil	548	1,498	4,092
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	1,074	2,935
Hondzonot	391	1,068	2,920
Yaxché	367	1,003	2,741
Cristal [Colonia]	352	962	2,629
San Pedro	136	372	1,016
Chan Chemuyil	127	347	948
Jacinto Pat	100	273	747
La Unión	74	202	553
Tankah Tres	62	169	463
La Unión	62	169	463
Bahías de Punta Solimán	56	153	418
La Ceiba	45	123	336
Kilómetro Doce	40	109	299
Marités	36	98	269
El Pequeño Paraíso	34	93	254
Don Brígido	33	90	246
Dos Palmas	32	87	239
Gran Bahía Príncipe	29	79	217
India Blanca	26	71	194
Árboles Tulum	20	55	149
India Blanca	19	52	142
Las Dos Hermanas	18	49	134
Tres Hermanos	18	49	134
Alfa y Mega	16	44	119
San Nazarén	16	44	119
Punta Sur	16	44	119
Akumal Sur	15	41	112
Aventuras Akumal	15	41	112
Cafeto Cimarrón	15	41	112
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	41	112
Tres Vírgenes	14	38	105
Océano Azul	12	33	90
Balam Luum	11	30	82
El Cedro	11	30	82
Yolis	10	27	75
Koox Campestre	9	25	67
Morales [Rancho]	9	25	67
Santa María	9	25	67
Paraíso [Rancho]	9	25	67
Cachito de Cielo	9	25	67
Lum Ha [Lotes]	9	25	67
San José	8	22	60
Ek Che	7	19	52
Tankah Cuatro	7	19	52
Cenote Calavera	7	19	52
Noh Aaktun	7	19	52
El Palomar	7	19	52
Vivero Jardín	7	19	52
Chonita	7	19	52
Ixchel [Rancho]	7	19	52
Cayetano Nieto Colín	6	16	45
El Lagunero	6	16	45
Kirabo	6	16	45
El Venado	6	16	45
Yalkú	6	16	45
La Casa de las Mariposas	6	16	45
Las Dos Luces	6	16	45
San Antonio	6	16	45
Tulum Monkey Santuary (TMS)	6	16	45
Dylan Chimal Herrera	6	16	45
Valle de Barak	6	16	45
Balam Canché	5	14	37
Kaakulxa	5	14	37
San Felipe	5	14	37
San Miguel	5	14	37
Ninguno	5	14	37
Tres Nietos (Don Lupe)	5	14	37
Doña Martina [Vivienda]	5	14	37
Yax'muul [Rancho]	5	14	37
Cobá [Hacienda]	5	14	37
Inlakech	5	14	37
Nooch [Cenote]	5	14	37
Casa Nalum	4	11	30
Playa Manatí	4	11	30
Kaape Ha	4	11	30
Casa Amparo	4	11	30
Los Gatos Negros	4	11	30
Casa de los Pelícanos	4	11	30
Las Amarantas	4	11	30
Camino Maya	4	11	30
Sac-Be	4	11	30
El Lince	4	11	30
Harumi Fandiño Sakane	4	11	30
Najil'kaax [Rancho]	4	11	30
Akunynam	4	11	30
Paraíso	4	11	30
Machete [Rancho]	4	11	30
El Tigre [Rancho]	4	11	30
El Palancar	3	8	22
Boca Paila	3	8	22
La Esperanza	3	8	22
El Paraíso	3	8	22
Pedro Paila	3	8	22
San Juan	3	8	22
Antonio Pool	3	8	22
Cenote Zazil-Ha	3	8	22
Nubia Aracely González López	3	8	22
Kilómetro Seis	3	8	22
The Jungle Place	3	8	22
Casa Tzalam	3	8	22
Silvia Canché	3	8	22
Mauricio [Rancho]	3	8	22
Las Cabañas	2	5	15
Casa del Sol	2	5	15
Doña Leonor	2	5	15
EA	2	5	15
Houston	2	5	15
Jorge Portilla Manica	2	5	15
Lol Beh	2	5	15
Pesca Maya	2	5	15
La Nueva Esperanza	2	5	15
San Mateo	2	5	15
SEMARNAT	2	5	15
La Teresita	2	5	15
Xbecal	2	5	15
La Culebra	2	5	15
Mucuy [Rancho]	2	5	15
Loma Linda	2	5	15
El Pedregal	2	5	15
The Smilling Iguana	2	5	15
Ninguno [Vivero]	2	5	15
Alux	2	5	15
Casa Celeste	2	5	15
Efraín Cen	2	5	15
Yum' Kíim	2	5	15
Tho [Cenote]	2	5	15
Casa Indi	2	5	15
Mi Amigo Faisán [Restaurante]	2	5	15
Xcacel [Residencial]	2	5	15
Casa Wom	2	5	15
Caleta Tankah	1	3	7
Chan Ha	1	3	7
Crucero de las Ruinas de Tulum	1	3	7
El Campesino	1	3	7
María Magdalena	1	3	7
Rancho Mariposa	1	3	7
San José	1	3	7
Sol Caribe	1	3	7
Sol Maya	1	3	7
Don Renzo	1	3	7
El Teterete	1	3	7
Áaktun Ha	1	3	7
El Álamo	1	3	7
Aluxes	1	3	7

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL (habitantes)	POBLACIÓN A 2030 (habitantes)	POBLACIÓN A 2050 (habitantes)
Yakunah	1	3	7
La Pescadora	1	3	7
Alejandro Terrazas	1	3	7
San Manuel	1	3	7
Santo Domingo	1	3	7
Ranitas [Vivero]	1	3	7
Balam Ak'ab	1	3	7
Eleazar Pool [Vivienda]	1	3	7
Treinta y Uno [Lote]	1	3	7
Manuel Chivero	1	3	7
Pueblito Chemuyil	1	3	7
Dreams Tulum [Poblado de Apoyo del Hotel]	1	3	7
Número Siete	1	3	7
Canbalan [Rancho]	1	3	7
Pakchen [Rancho]	1	3	7
La Picuda	1	3	7
Rancho Antigua	1	3	7
Dzidzilché [Villa]	1	3	7
Villa Dzidzilché	1	3	7
Cobá [Rancho]	1	3	7
Pacha Mamá	1	3	7
San Pablo	1	3	7
Total del municipio	**46,721**	**127,673**	**348,889**

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INEGI (2020). Principales resultados por localidad (ITER).

4.3.1.3. Distribución de población

La forma en que se distribuye la población se comporta de manera desigual, algunas ciudades tienen una población muy grande y otras son de menor tamaño. No se encuentran ordenadas de manera uniforme. Debido a la migración del campo a las ciudades el número de localidades rurales ha disminuido. En la siguiente tabla se muestra el número de localidades de acuerdo con el tamaño de población al interior del municipio de Tulum.

Tabla 18. Localidades y población total por municipio según tamaño de localidad

Municipio de Tulum	Total de localidades y población	Habitantes por tamaño de localidad			
		1 a 249	250 a 499	500 a 999	1,000 a 2,499
Localidades	177	162	4	6	4
Población	46, 721	1,570	1,503	4,016	6,258

Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020. Tabulados del Cuestionario Básico (INEGIa, 2020).

4.3.1.4. Composición por edad y sexo

La composición de la población de acuerdo con el número de hombres y mujeres y rangos de edad es el resultado acumulativo de las tendencias de la fecundidad, mortalidad y migración. En la tabla siguiente se muestra la composición de la población del municipio de Tulum por rangos de edad, asimismo, se muestra la población proyectada a 2030 y 2050 a partir de los datos proporcionados por el Censo de Población y Vivienda del INEGI 2020.

Tabla 19. Grupos quinquenales de edad y sexo y su proyección a 2050

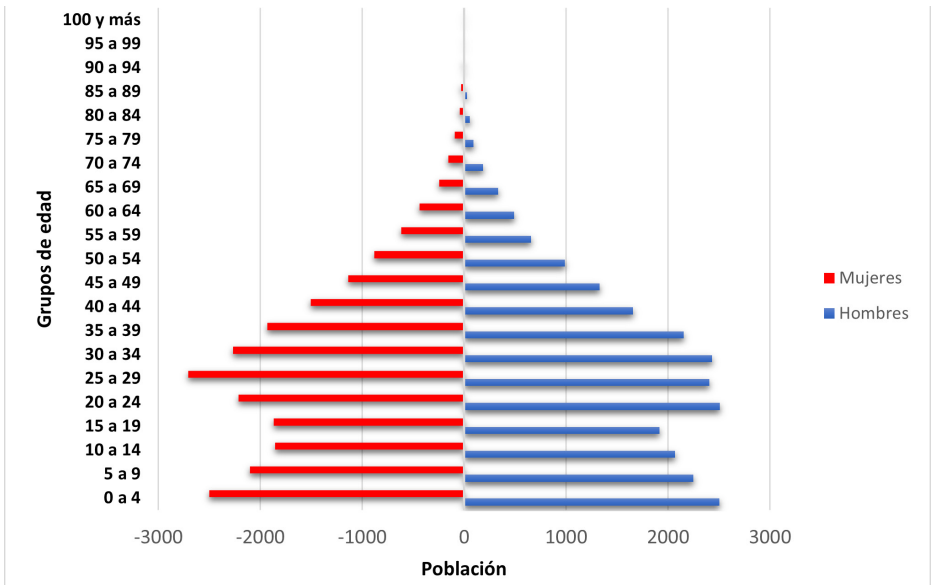
	Censo		Población proyectada	
Año	2020	2030	2030	2050
Rangos de edad (años)	Total	Hombres (H) y mujeres (M)	Población total por rangos de edad	
0 a 4	5,001	M: 2,498 H: 2,503	13,666	37,345
5 a 9	4,346	M: 2,100 H: 2,246	11,876	32,454
10 a 14	3,922	M: 1,854 H: 2,068	10,718	29,288
15 a 19	3,786	M: 1,870 H: 1,916	10,346	28,272
20 a 24	4,720	M: 2,211 H: 2,509	12,898	35,247
25 a 29	5,111	M: 2,706 H: 2,405	13,967	38,166
30 a 34	4,699	M: 2, 269 H: 2,430	12,841	35,090
35 a 39	4,081	M: 1,929 H: 2,152	11,152	30,475
40 a 44	3,161	M: 1,504 H: 1,657	8,638	23,605
45 a 49	2,467	M: 1,138 H: 1,329	6,742	18,422
50 a 54	1,868	M: 881 H: 987	5,105	13,949
55 a 59	1,274	M: 616 H: 658	3,481	9,514
60 a 64	926	M: 436 H: 490	2,530	6,915
65 y más	1,295	M: 588 H: 707	3,539	9,670
Total	**46,657**	**46,657**	**127,498**	**348,411**

Fuente: Elaboración propia a partir del Censo de Población y Vivienda 2020. Tabulados del Cuestionario Básico (INEGIa, 2020).

La estructura demográfica hace referencia a la composición de la población según sexo y edad, para un tiempo determinado; y suele exponerse a través de la pirámide poblacional, que no es más que un histograma de barras horizontales donde se pueden representar las proporciones de hombres y mujeres por grupos de edad (generalmente quinquenios) con respecto al total de la población. Para este trabajo se expresa la pirámide de población a escala municipal y de la ciudad de Tulum, esta última, la única localidad urbana con la que cuenta el municipio (figura 10).

Como se puede observar en la figura 21 el grupo de la población más grande se encuentra en el rango de 25 a 29 años en mujeres y 20 a 24 años hombres. De la misma manera, y para ambos sexos, se da en el rango de 0 a 4 años. La forma de la pirámide de población del municipio (triangular) significa población joven, su base es ancha, debido a su alta tasa de natalidad e inmigración. La población desciende rápidamente hacia la cima reflejando una población en su mayoría joven y poca población longeva. Por su parte, la pirámide de población para la ciudad de Tulum, la localidad más poblada del municipio tiene el mismo comportamiento que la del municipio, esto se debe a que la ciudad de Tulum concentra aproximadamente el 70% de la población municipal total (figura 9).

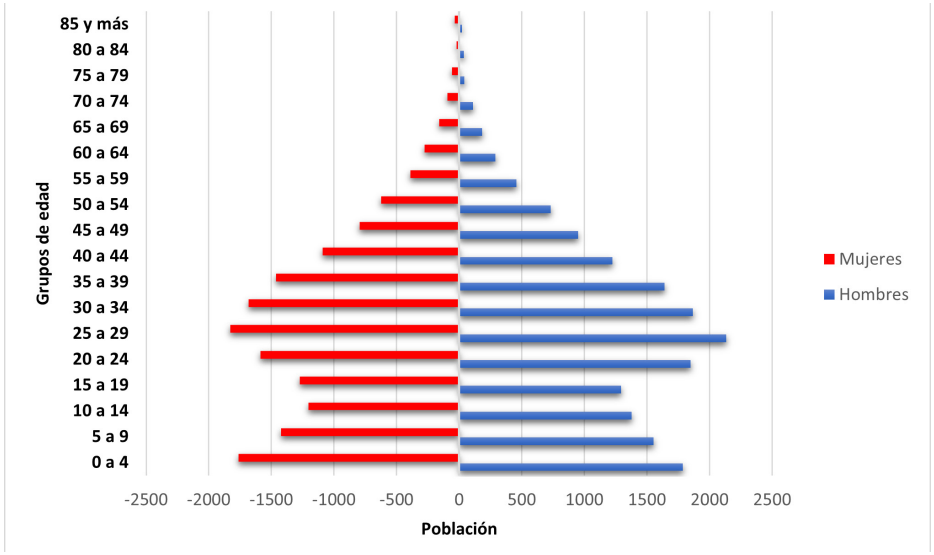
Figura 21. Pirámide de Población del municipio de Tulum 2020



Fuente: Principales Resultado por Localidad. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México (INEGI, 2020).

Ahora bien, a escala urbana, la ciudad de Tulum (única ciudad urbana del municipio) en 2020 contaba con 33,374 habitantes. La cual se distribuía en 15, 830 mujeres y 17, 544 hombres. La edad mediana del estado fue en 2020 de 28 años, para el municipio fue de 26, menor a la estatal y para la ciudad de Tulum 27. Con lo anterior, el grado de envejecimiento de la población es menor que en otras ciudades (figura 22).

Figura 22. Pirámide de Población de la ciudad de Tulum 2020



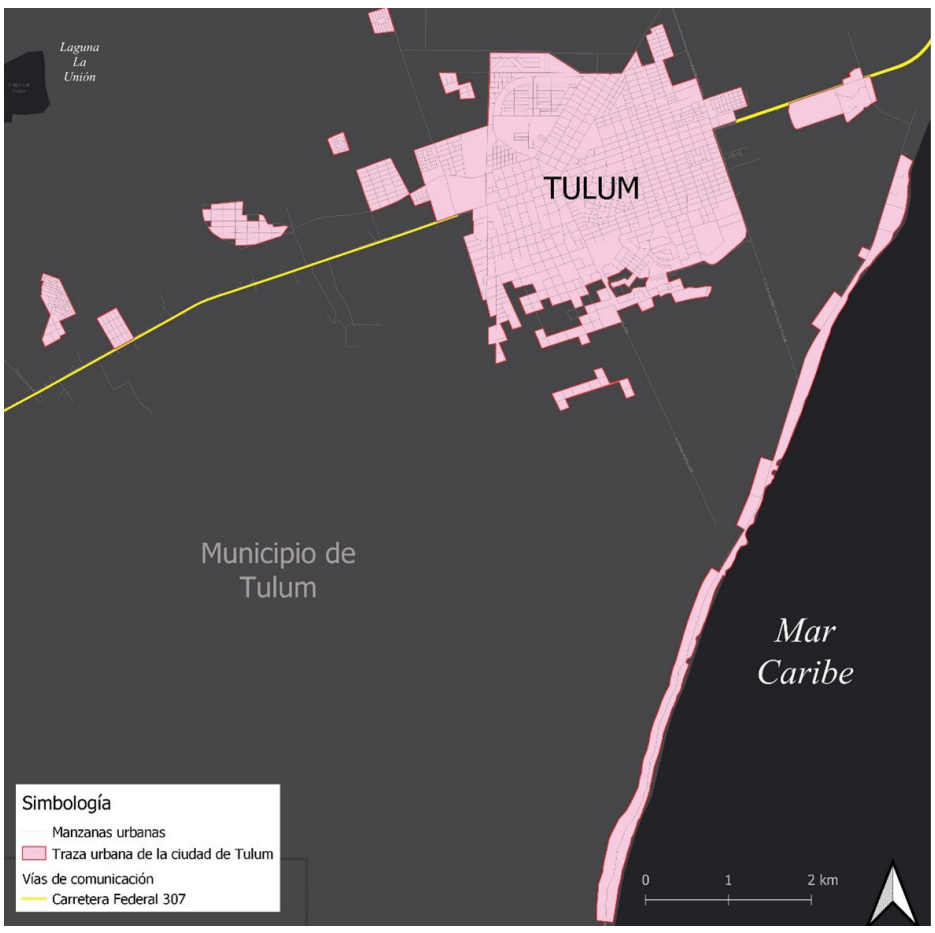
Fuente: Principales Resultado por Localidad. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México (INEGI, 2020).Densidad de la población (por manzana en zonas urbanas)

4.3.1.5. Densidad de la población

La distribución de la población de una ciudad, región, país no es igual en todas las áreas, en algunas se concentra en las zonas urbanas o económicamente más activas o zonas industriales, y en otras, se encuentra más dispersa.

El municipio de Tulum representa una densidad poblacional de 23 habitantes por km2 con una tasa de crecimiento del 5.1%. No obstante, el 70% de la población total del municipio se concentra en la ciudad de Tulum, por tal motivo su crecimiento interno ha sido desmedido y muy acelerado. Para poder obtener la densidad aproximada actual de la ciudad, se anexó a la traza de la ciudad urbana de Tulum áreas urbanas no contempladas por el INEGI, pero que son áreas que forman parte de la ciudad de Tulum (figura 23).

Figura 23. Traza urbana de la ciudad de Tulum 2020



A partir de lo anterior, el total de la superficie contemplada integral para la ciudad de Tulum fue de 1,263 hectáreas (12.63 km2) con una población total de 33,837 habitantes (INEGI, 2020), por lo consiguiente la densidad de población para la ciudad de Tulum es de 27 habitantes por hectárea.

Se calculó la densidad poblacional para las 10 localidades principales del municipio de acuerdo con su población (tabla 20), teniendo como criterio un mínimo de 500 habitantes, así la localidad con menos habitantes es Ciudad Chemuyil (548 habitantes) con un área superficial de 14 hectáreas y una densidad de 39 hab/ha (tabla 20) y la mayor Akumal con 2,154 habitantes y una densidad de 35 hab/ha (tabla 20).

Tabla 20. Densidad poblacional de las principales localidades del municipio de Tulum

Localidad	Población total (habitantes)	Superficie (ha)	Densidad de población (hab/ha)
Akumal	2,154	62	35
Cobá	1,738	54	32
Francisco Uh May	1,288	69	19
Chanchén Primero	1,078	42	26
Macario Gómez	884	42	21
San Juan	770	35	22
Manuel Antonio Ay	621	30	21
Chanchén Palmar	597	26	23
Sahcab Mucuy	596	22	27
Ciudad Chemuyil	548	14	39

Fuente: Censo de Población y Vivienda (INEGI,2020) y Marco Geoestadístico 2021 (INEGI, 2022).

La densidad de población también se calculó a nivel manzana urbana, para lo cual se tomó como base la traza urbana de la ciudad de Tulum (figura 12), la cual se divide en 41 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB). Las AGEB se definen como áreas geográficas ocupadas por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de las zonas urbanas que son aquellas con población mayor o igual a 2,500 habitantes y en las cabeceras municipales. El total de manzanas contenidas en los cuarenta y uno AGEBs son 978.

En la figura 24 se observa 38 manzanas con densidades de 250 habitantes o más, las cuales se concentran en el centro de la ciudad, lo que podemos identificar como el primer cuadro urbano. En contraste, se observa en los límites de la ciudad áreas con densidades de 1 a 50 habitantes por hectárea (582 manzanas). Referidos a la expansión de la ciudad y los nuevos desarrollos habitacionales. También se observan manzanas sin habitantes o población, pero ya con áreas urbanas lotificadas (268 manzanas). Las noventa manzanas restantes la densidad observada se encuentra entre 51 a 249 hab/ha.

La población de la ciudad de Tulum se encuentra concentrada hacia su interior, pero se observa un crecimiento urbano en expansión, debido a su principal actividad económica centralizada en las actividades turísticas y los procesos de migración. Lo anterior conlleva retos como la dotación de los servicios básicos y el manejo de la basura. Como ejemplo, ante un posible desastre producido por el impacto de un huracán, uno de los servicios más afectados y, por lo general, no atendido con la prioridad debida, es el sistema de manejo y recolección de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Este servicio puede verse interrumpido y provocar la acumulación de escombros de edificios, árboles y otro tipo de basura, como animales muertos (Hernández-Aguilar, et al., 2021).

4.3.2. Características sociales

Los factores sociales de cualquier país o región determinan el aumento de la población, entre ellos se encuentran la natalidad, la mortalidad, los servicios y la migración. En las últimas décadas, la mortalidad ha decrecido debido al aumento del nivel de vida de la población. Un factor negativo de crecimiento de la población se concreta en la mortalidad infantil, es decir, en el de las defunciones de niños menores de un año, defunciones que, en la medida que son más numerosas, indican el estado de atraso económico y social de una región, país o ciudad.

En México, en las últimas décadas esta mortalidad ha descendido considerablemente, sin embargo, aún no se ha abatido por completo este grave problema.

En las costas de Quintana Roo, el fomento al turismo, como principal motor de la economía, se ha basado en el crecimiento turístico de la modalidad de sol y playa. Por lo tanto, Tulum, como municipio costero obedece a esta dinámica como en otras ciudades costeras de la entidad. Sus conexiones económicas con el mundo se dan a través de empresas transnacionales que estratégicamente apoyan esta expansión territorial y su competitividad con otros destinos, haciendo inequitativo el crecimiento económico dentro del mismo municipio.

De acuerdo con Arroyo et al. (2015) el espacio turístico litoral de Tulum se ha convertido en una unidad de circulación de capital donde se ha privilegiado la inmigración tanto de nacionales como de extranjeros, con un crecimiento lineal de consorcios turísticos u otros negocios vinculados al turismo, observados principalmente a lo largo de su costa y en el centro de la ciudad, dando lugar a un ambiente multicultural y a una economía con mercados extranjeros, principalmente.

Lo anterior, ha ocasionado cambios en el territorio y en la estructura urbana manifestándose en desigualdades de los grupos sociales, minimizando el desarrollo local. Este último aspecto se refleja también en el empleo, que al igual que el resto de México, la gran mayoría de los empleos que genera el ramo turístico es de baja calificación laboral y con bajas remuneraciones (Arroyo et al., 2015).

Esta sección muestra estas condiciones o factores sociales de la población radicada en el municipio de Tulum con base, principalmente, de los resultados del último Censo de Población y Vivienda del INEGI 2020.

4.3.2.1. Analfabetismo

De acuerdo con el INEGI (2020), aunque en el país la educación básica (preescolar, primaria y secundaria) cada vez llega a más lugares, muchos jóvenes, por diversas razones, no asisten a la escuela y, por lo tanto, algunos de ellos no saben leer ni escribir. Podemos definir a un "Analfabeta(o) como la persona de 15 o más años de edad que no sabe leer ni escribir un recado" (INEGI, 2020).

En México, durante los últimos 50 años, el porcentaje de personas analfabetas de 15 y más años bajó de 25.8 % en 1970 a 4.7 % en 2020, lo que equivale a 4,456,431 personas que no saben leer ni escribir (INEGI, 2020).

En este sentido, existe un porcentaje de la población que no asiste a la escuela, para el municipio de Tulum se muestra este dato por rango de edad desde los 3 años a los 24 (Tabla 21). Para el cálculo de este indicador se señala el porcentaje total por rango de edad de la población que no asiste a la escuela y se muestra la proporción por género para esta variable (Tabla 21). Por ejemplo, se destaca un mínimo porcentaje de población que no asiste a la escuela entre los 6 y 11 años (9%); y de ahí va incrementándose, como se observa en la población entre 12 a 14 con el 15% y de 15 a 17 con el 36% (Tabla 21). Es de llamar la atención el rango de los 18 a 24 años, edad en la que la población inicia su vida laboral, muestra que el 85% no asiste a la escuela. Lo anterior puede deberse a la dinámica económica que vive el municipio.

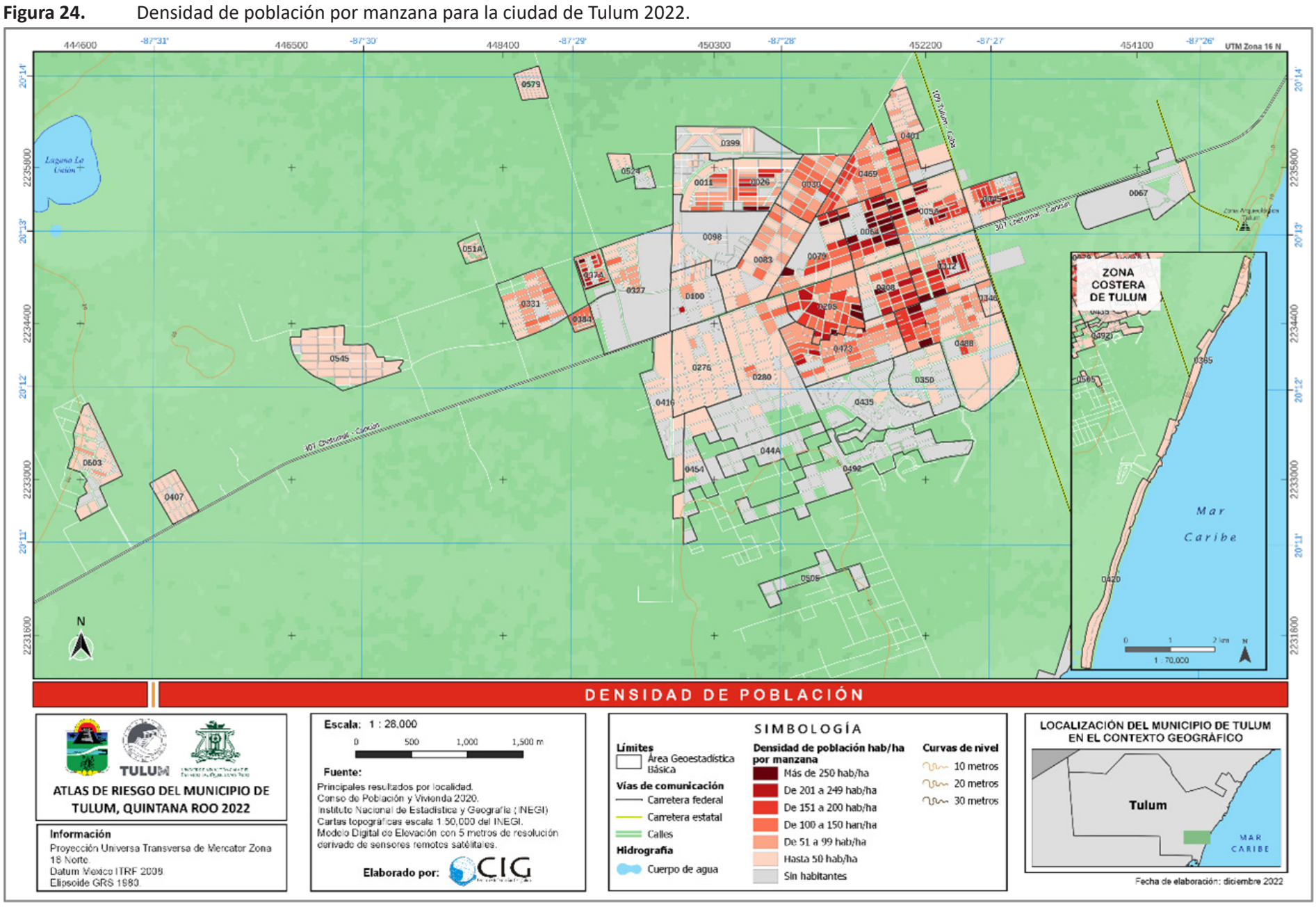
Tabla 21. Población municipal que no asiste a la escuela por rango de edad

Población total de 3 a 5		Femenina	%	Masculina	%
3,041		1,512	50	1,529	50
Población de 3 a 5 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
1,272	42	646	43	626	57
Población total de 6 a 11		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
4,923		2,365	48	2,558	54
Población de 6 a 11 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
466	9	224	48	242	52
Población total de 12 a 14		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
2,264		1,071	47	1,193	53
Población de 12 a 14 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
349	15	181	52	168	48
Población total de 15 a 17		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
2,140		1,053	49	1,087	51
Población de 15 a 17 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
762	36	373	49	389	51
Población total de 18 a 24		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
6,366		3,028	48	3,338	54
Población de 18 a 24 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
5,407	85	2,541	47	2,866	53

Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Por otra parte, si observamos a nivel localidad urbana, es decir, la ciudad de Tulum, los porcentajes tienen una tendencia similar a los del municipio, resaltando los mismos rangos de edad, como la población de 6 a 11 años que no asiste a la escuela (10%); la de 12 a 14años con el 14%; la de 15 a 17 con el 35% y finalmente, también se muestra un 85% de población que no asiste a la escuela entre los 18 y 24 años (Tabla 22).

Figura 24. Densidad de población por manzana para la ciudad de Tulum 2022.



Fuente: Elaboración propia con base a los Principales Resultados por Localidad. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.

Tabla 22. Población municipal que no asiste a la escuela por rango de edad

Población total de 3 a 5		Femenina	%	Masculina	%
2,133		1,060	50	1,073	50
Población de 3 a 5 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
1,015	48	505	50	510	50
Población total de 6 a 11		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
3,293		1,564	47	1,729	53
Población de 6 a 11 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
323	10	157	49	166	51
Población total de 12 a 14		**Femenina**		**Masculina**	**%**
1,499		703	47	796	53
Población de 12 a 14 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
215	14	108	50	107	50
Población total de 15 a 17		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
1,458		711	49	747	51
Población de 15 a 17 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
506	35	237	47	269	53
Población total de 18 a 24		**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
4,546		2,151	47	2,395	53
Población de 18 a 24 que no asiste a la escuela	**%**	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
3,878	85	1,788	46	2,090	54

Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

En el **municipio de Tulum** con relación al grado de escolaridad y la población analfabeta, los indicadores señalan que de los 33,388 pobladores de 15 años y más, 47% son mujeres y 53% hombres, de los cuales solo existen 1,579 analfabetas (5%). Por otro lado, el grado promedio de escolaridad nos permite conocer el nivel de educación de una población determinada, en este sentido, en el municipio de Tulum el grado promedio fue de 9.28 en general y en el caso de mujeres 9.08 y para los hombres de 9.47, lo que significa que se cursó un poco más que el primer año de bachillerato (Tabla 23). Lo que coincide con la población que no asiste a la escuela entre los 18 y 24, ya que es la edad en que se debiera estar cursando la educación superior (Tabla 23).

Tabla 23. Población analfabeta y grado promedio de escolaridad del municipio de Tulum

Población de 15 años y más	Femenina	%	Masculina	%
33,388	15,847	47	17,541	53
Población de 15 años y más analfabeta[1]	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
1,579	934	59	645	41
Población de 15 años y más sin escolaridad[2]	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
1,985	1,063	54	922	46
Grado promedio de escolaridad[3]	**Femenina**		**Masculina**	
9.28	9.08		9.47	

Notas:
1 Personas de 15 a 130 años de edad que no saben leer y escribir un recado.
2 Personas de 15 a 130 años de edad que no aprobaron ningún grado escolar o que sólo tienen nivel preescolar.
3 Resultado de dividir el monto de grados escolares aprobados por las personas de 15 a 130 años de edad entre las personas del mismo grupo de edad. Excluye a las personas que no especificaron los grados aprobados.
Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

En el caso de la ciudad de Tulum, la estadística muestra algunas características similares al municipio (Tabla 24), lo que tiene sentido al concentrar un 70% de su población total. Por ejemplo, el porcentaje de población de 15 años y más en hombres y mujeres es similar al del municipio (47% y 53%, respectivamente). En cuanto a la población analfabeta el porcentaje es de 57% mujeres y 43% hombres. Existen 1,029 personas que no terminaron algún nivel escolar (Tabla 24). El grado promedio de escolaridad para la ciudad fue de 9.75, es decir, que la población de 15 años y más (24,203), en su mayoría alcanza el inicio del bachillerato o que no terminaron de estudiar ese nivel (Tabla 24).

Tabla 24. Población analfabeta y grado promedio de escolaridad de la ciudad de Tulum

Población de 15 años y más	Femenina	%	Masculina	%
24,203	11,382	47	12,821	53
Población de 15 años y más analfabeta[1]	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
702	397	57	305	43
Población de 15 años y más sin escolaridad[2]	**Femenina**	**%**	**Masculina**	**%**
1,029	524	51	505	49
Grado promedio de escolaridad[3]	**Femenina**		**Masculina**	
9.75	9.61		9.87	

Notas:
1 Personas de 15 a 130 años de edad que no saben leer y escribir un recado.
2 Personas de 15 a 130 años de edad que no aprobaron ningún grado escolar o que sólo tienen nivel preescolar.
3 Resultado de dividir el monto de grados escolares aprobados por las personas de 15 a 130 años de edad entre las personas del mismo grupo de edad. Excluye a las personas que no especificaron los grados aprobados.
Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

4.3.2.2. Discapacidad

De acuerdo con los principales resultados por localidad (ITER), el cual es un registro por localidad con los datos de identificación geográfica, así como 222 indicadores con las características de la población, los hogares censales y las viviendas que componen el Censo de Población (INEGI, 2020); la población con discapacidad se define como:

Personas que realizan con mucha dificultad o no pueden hacer al menos una de las siguientes actividades: ver, aun usando lentes; oír, aun usando aparato auditivo; caminar, subir o bajar; recordar o concentrarse; bañarse, vestirse o comer; hablar o comunicarse.

En situaciones de riesgo, las personas con discapacidad se ven afectadas de manera extrema en situaciones de desastre, emergencia y conflicto debido a que las medidas de evacuación, respuesta (incluidos los refugios, hospitales y la distribución de alimentos) y recuperación les resultan inaccesibles. Los gobiernos en reconocimiento de las vulnerabilidades concretas de las personas con discapacidad en situaciones de riesgo se han comprometido a garantizar la protección y seguridad de estas personas.

La Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad de las Naciones Unidas aprobada en diciembre de 2006, entró en vigor el 3 de mayo de 2008 (ONU, 2014). Marca un “cambio de paradigma” en las actitudes y criterios respecto de las personas con discapacidad. Va un paso más allá en el proceso de dejar de considerar a las personas con discapacidad como “objetos” de caridad, tratamiento médico y protección social para considerarlas “sujetos” con derechos, capaces de reclamar esos derechos y de tomar decisiones sobre su vida basadas en su consentimiento libre e informado, además de ser miembros activos de la sociedad.

Con esta definición se muestra la población con discapacidad en el municipio de Tulum, así como las localidades que cuenten con información, con el fin de garantizar una mayor libertad de actuación en la toma de decisiones bajo una amenaza natural o antropogénica (Tabla 25).

Como se muestra en la Tabla 25 el total de personas con discapacidad en el municipio de Tulum fue de 1,211, lo que representa un 3% de la población total para el año 2020. Con relación a su población total las localidades con un mayor porcentaje de población con discapacidad fueron Kilómetro Diez Punto Cinco con el 13.3%, Bahías de Punta Solimán con el 7.1%, Aventuras Akumal y Cafeto Cimarrón con el 6.7% y Cobá con el 5.2%.

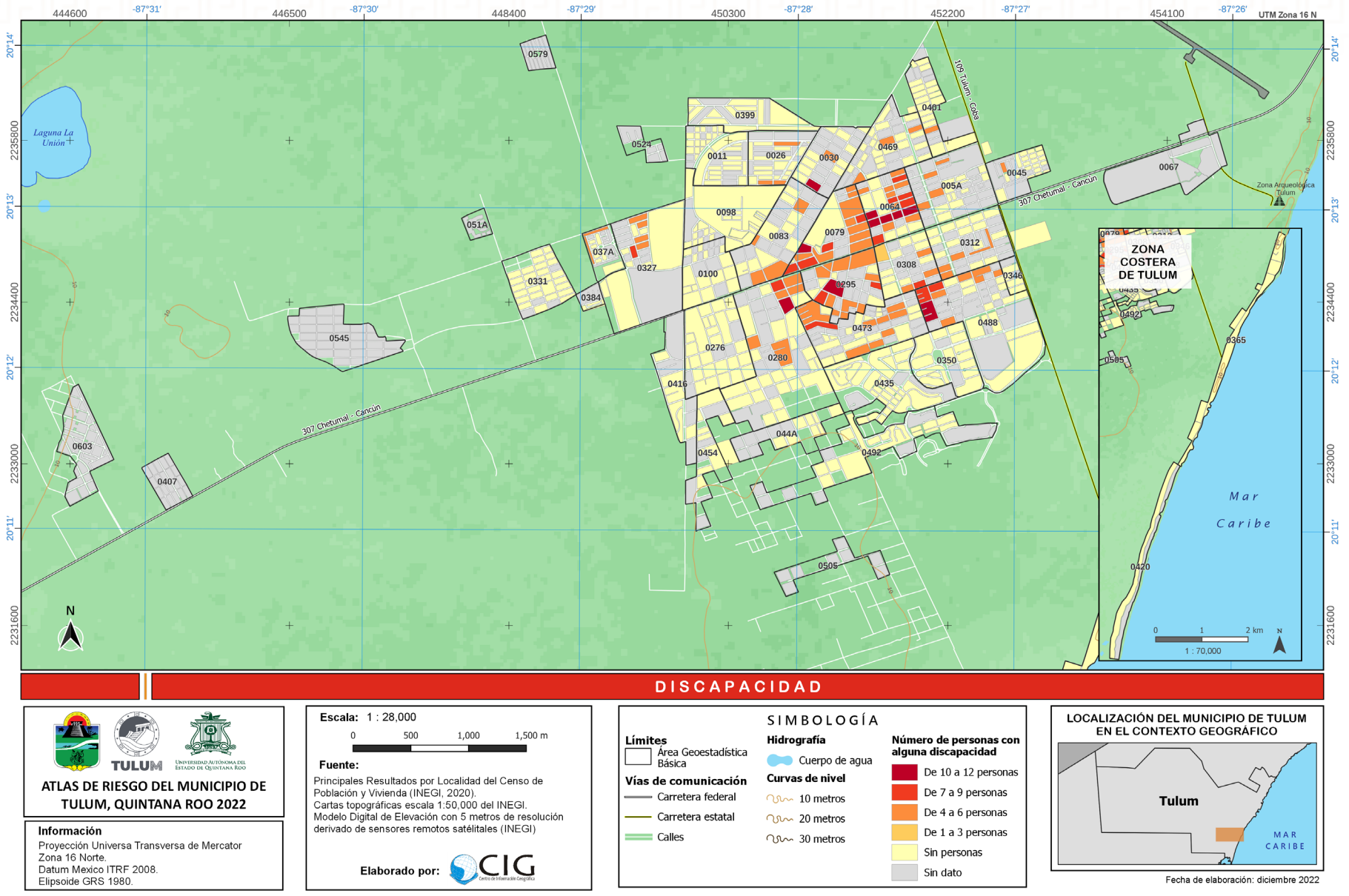
Tabla 25. Población con discapacidad por localidad

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL (habitantes)	POBLACIÓN CON DISCAPACIDAD	%
Tulum	33,374	810	2.4
Akumal	2,154	50	2.3
Cobá	1,738	90	5.2
Francisco Uh May	1,288	30	2.3
Chanchén Primero	1,078	41	3.8
Macario Gómez	884	22	2.5
San Juan	770	35	4.5
Manuel Antonio Ay	621	21	3.4
Chanchén Palmar	597	9	1.5
Sahcab Mucuy	596	8	1.3
Ciudad Chemuyil	548	15	2.7
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	5	1.3
Hondzonot	391	15	3.8
Yaxché	367	14	3.8
Cristal [Colonia]	352	5	1.4
San Pedro	136	5	3.7
Chan Chemuyil	127	2	1.6
La Unión	74	1	1.4
Tankah Tres	62	2	3.2
Bahías de Punta Solimán	56	4	7.1

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL (habitantes)	POBLACIÓN CON DISCAPACIDAD	%
El Pequeño Paraíso	34	1	2.9
Dos Palmas	32	1	3.1
Gran Bahía Príncipe	29	1	3.4
Árboles Tulum	20	1	5.0
Tres Hermanos	18	1	5.6
Aventuras Akumal	15	1	6.7
Cafeto Cimarrón	15	1	6.7
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	2	13.3
Total	**45,784**	**1,193**	**3**

Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Figura 25. Población con discapacidad por localidad



Fuente: Elaboración propia con base a los Principales Resultados por Localidad. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.

Localidades de una vivienda	**334**	**14**	**4.2**
Localidades de dos viviendas	**94**	**4**	**4.3**
Total	**428**	**18**	**4.2**

Total municipal	**46,212**	**1,211**	**3**

Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Por otro lado, para un análisis a nivel ciudad urbana, se identificaron 41 AGEB (Área Geoestadística Básica) para la ciudad de Tulum. Los AGEB se definen como áreas geográficas ocupadas por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas. Este tipo de AGEBs urbanas se asignan en áreas geográficas de localidades que tengan una población igual o mayor a 2,500 habitantes. Estos identificadores sirven para georreferenciar la información que el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) genera, sumando los identificadores de localidades y manzanas.

En este caso para la ciudad de Tulum, se analizó la distribución de la población con alguna discapacidad a nivel manzana. Como se puede observar en la figura 13 son mínimas las manzanas donde se localizan personas con alguna discapacidad (AGEBs: 0064; 0079; 0295; 0488; 0280 y 0030), concentrándose en el centro de la ciudad donde se indica en color rojo manzanas con 10 a 12 personas con alguna discapacidad, en color naranja fuerte de 7 a 9, en naranja de 4 a 6 y en amarillo fuerte de 1 a 3.

Tener una discapacidad es otro de los factores que hacen mucho más riesgoso enfrentarse a un desastre natural, dada la serie de desigualdades que la discapacidad imprime en la cotidianidad de quienes viven con ella.

Las diferencias de género, edad, condición económica, discapacidad, entre otras, influyen en cómo nos impactan los distintos fenómenos naturales y antropogénicos, por lo que el tener acceso a información sobre estos y sus riesgos, así como en ser parte de las estrategias de protección para los planes de mitigación es transcendental.

4.3.2.3. Lengua indígena

Los pueblos indígenas de todo el mundo plantean que es necesario el reconocimiento de sus derechos, sistemas y saberes en los procesos de prevención, emergencia y reconstrucción. Si bien, se encuentran entre los grupos con mayor vulnerabilidad a los eventos climáticos, también son ellos quienes se han adaptado a estos cambios desde su visión cultural. Los conocimientos indígenas pueden y deben incidir en el fortalecimiento institucional y organizativo propio, ser sujetos de derechos y salvaguardas, además de contar con incidencia y participación en la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD).

Para que los pueblos indígenas sean partícipes, se necesita conocer el número y distribución de estos, para poder tomar medidas e involucrarlos en el desarrollo de los procesos de gestión cultural de los territorios indígenas como mecanismo de resiliencia y adaptación, incluyendo acciones de análisis, planificación, evaluación, monitoreo y comunicación en idiomas indígenas.

En este sentido, la tabla 26 muestra la población que habla alguna lengua indígena en el municipio y su porcentaje con relación a la población total. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020), en 40 de las 177 localidades del municipio hay población que habla alguna lengua indígena (22.6% de las localidades totales).

En la tabla 26 se puede observar que las localidades que cuentan con población mayor a 3 años y que solo HABLA UNA LENGUA INDÍGENA y NO HABLAN ESPAÑOL son de mayor a menor: Yaxché (23.2%), Sahcab Mucuy y Chanchén Palmar con el 14.6%, San Juan (10.6%), Hondzonot (10.2%), Chanchén Primero (5.9%), Cobá (3.9%), San Pedro (2.9%) y Kilometro Doce (2.5%), las restantes solo alcanzaron un 1% o menos.

El total de población que HABLA ALGUNA LENGUA INDÍGENA fue de 11,088 y el total de población de 3 años y más que habla alguna lengua indígena Y NO HABLA ESPAÑOL fue de 620 (tabla 26), lo anterior representa el 24% y 1%, respectivamente.

Tabla 26. Población que habla alguna lengua indígena y población que no habla español por localidad

NOMBRE LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	Población de 3 años y más que HABLA ALGUNA LENGUA INDIGENA	(%)	Población de 3 años y más habla alguna lengua indígena y NO HABLA ESPAÑOL	(%)
Tulum	33,374	5,349	16	52	0.2
Akumal	2,154	392	18	14	0.6
Akumal Sur	15	2	13	0	0.0
Aventuras Akumal	15	2	13	0	0.0
Gran Bahía Príncipe	29	2	7	0	0.0
Bahías de Punta Solimán	56	12	21	0	0.0
Chanchén Palmar	597	441	74	87	14.6
Chanchén Primero	1,078	517	48	64	5.9
Chan Chemuyil	127	5	4	0	0.0
Ciudad Chemuyil	548	116	21	1	0.2
Cobá	1,738	1,027	59	68	3.9
Las Dos Hermanas	18	1	6	0	0.0
Dos Palmas	32	8	25	0	0.0
Francisco Uh May	1,288	558	43	14	1.1
Hondzonot	391	226	58	40	10.2
Jacinto Pat	100	23	23	0	0.0
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	16	4	0	0.0
El Pequeño Paraíso	34	9	26	0	0.0
Macario Gómez	884	237	27	10	1.1
Manuel Antonio Ay	621	313	50	6	1.0
Sahcab Mucuy	596	530	89	87	14.6
San Juan	770	603	78	82	10.6
Alfa y Mega	16	1	6	0	0.0
Tankah Tres	62	14	23	0	0.0
Tres Hermanos	18	11	61	0	0.0
Yaxché	367	337	92	85	23.2
Cenote Calavera	7	3	43	0	0.0
India Blanca	19	3	16	0	0.0
La Ceiba	45	0	0	0	0.0
La Unión	74	1	1	0	0.0
La Unión	62	5	8	0	0.0
India Blanca	26	7	27	0	0.0
Punta Sur	16	6	38	0	0.0
Paraíso [Rancho]	9	3	33	0	0.0
Árboles Tulum	20	8	40	0	0.0
San Pedro	136	100	74	4	2.9
Cristal [Colonia]	352	64	18	1	0.3
Marités	36	6	17	0	0.0
Don Brígido	33	3	9	0	0.0
Kilómetro Doce	40	11	28	1	2.5
Localidades de una vivienda	**334**	**94**	**28**	**4**	**1**
Localidades de dos viviendas	**94**	**22**	**23**	**0**	**0**
TOTAL DEL MUNICIPIO	**46,721**	**11,088**	**24**	**620**	**1**

Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

4.3.2.4. Salud

El propósito de conocer los servicios de salud con los que cuentan las ciudades y municipios es seguir fortaleciendo la reducción del riesgo de desastres para prevenir muertes, enfermedades y el impacto psicológico de las amenazas. Además de la edad, en muchos desastres existe un riesgo de morir asociado a las condiciones sociales de las personas en el momento del impacto, el que exista la posibilidad de que queden atrapadas, el tiempo empleado para su rescate y la ayuda médica, son fundamentales en estos contextos.

Por tal motivo, es necesario conocer cuanta población está afiliada y cuanta no está afiliada a servicios médicos en alguna institución pública o privada. Este conocimiento permite a los gobiernos identificar, cuantificar, analizar, hacer seguimiento e intervenir (desde la prevención hasta la atención) evitando o reduciendo los riesgos para la salud de las personas, familias y comunidades.

El municipio de Tulum cuenta con una población afiliada de 28, 331, lo que equivale a un 61% de su población total (tabla 27). Esto significa que aún un 40% de la población no tiene acceso a servicios de salud.

En este sentido se muestra la población del municipio y localidades que se encuentra afiliada y cuánta de ella no cuenta con algún servicio de salud.

Tabla 27. Población que se encuentra afiliada a servicios de salud y población no derechohabiente.

Localidad	Población Total	SIN afiliación a servicios de salud	%	AFILIADA a servicios de salud	%
Tulum	33374	13,765	41	19,480	58
Akumal	2154	874	41	1,278	59
Akumal Sur	15	2	13	13	87
Aventuras Akumal	15	7	47	8	53
Gran Bahía Príncipe	29	7	24	22	76
Bahías de Punta Solimán	56	15	27	37	66
Balam Canché	5	1	20	4	80
Chanchén Palmar	597	90	15	507	85
Chanchén Primero	1078	166	15	912	85
Chan Chemuyil	127	39	31	88	69
Ciudad Chemuyil	548	39	7	509	93
Cobá	1738	687	40	1,049	60
Las Dos Hermanas	18	4	22	13	72
Dos Palmas	32	16	50	16	50
Francisco Uh May	1288	478	37	810	63
Hondzonot	391	38	10	353	90
Jacinto Pat	100	40	40	59	59
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	160	41	233	59
El Pequeño Paraíso	34	12	35	22	65
Kirabo	6	5	83	1	17
Macario Gómez	884	341	39	543	61
Manuel Antonio Ay	621	145	23	476	77
Sahcab Mucuy	596	49	8	547	92
San Juan	770	299	39	471	61
Alfa y Mega	16	8	50	8	50
Tankah Tres	62	2	3	58	94
Tres Hermanos	18	7	39	11	61
Yaxché	367	132	36	235	64
Balam Luum	11	6	55	5	45
Cenote Calavera	7	1	14	6	86
India Blanca	19	12	63	7	37
La Ceiba	45	21	47	23	51
La Unión	74	62	84	12	16
La Unión	62	50	81	12	19
Yolis	10	4	40	6	60
Cafeto Cimarrón	15	11	73	4	27
India Blanca	26	10	38	16	62
Punta Sur	16	1	6	15	94
Paraíso [Rancho]	9	4	44	5	56
Yax'muul [Rancho]	5	3	60	2	40
Árboles Tulum	20	5	25	15	75
San Pedro	136	76	56	60	44
Cristal [Colonia]	352	263	75	89	25
Cachito de Cielo	9	5	56	4	44
Marités	36	19	53	17	47
Don Brígido	33	20	61	13	39
Océano Azul	12	9	75	3	25
Kilómetro Doce	40	23	58	17	43
Lum Ha [Lotes]	9	5	56	4	44
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	6	40	9	60
Total localidades	**46,293**	**18,044**	**39**	**28,107**	**61**
Localidades de una vivienda	**334**	**168**	**50**	**165**	**49**
Localidades de dos viviendas	**94**	**35**	**37**	**59**	**63**
Total	**428**	**203**	**47**	**224**	**52**
Total del Municipio	**46,721**	**18,247**	**39**	**28,331**	**61**

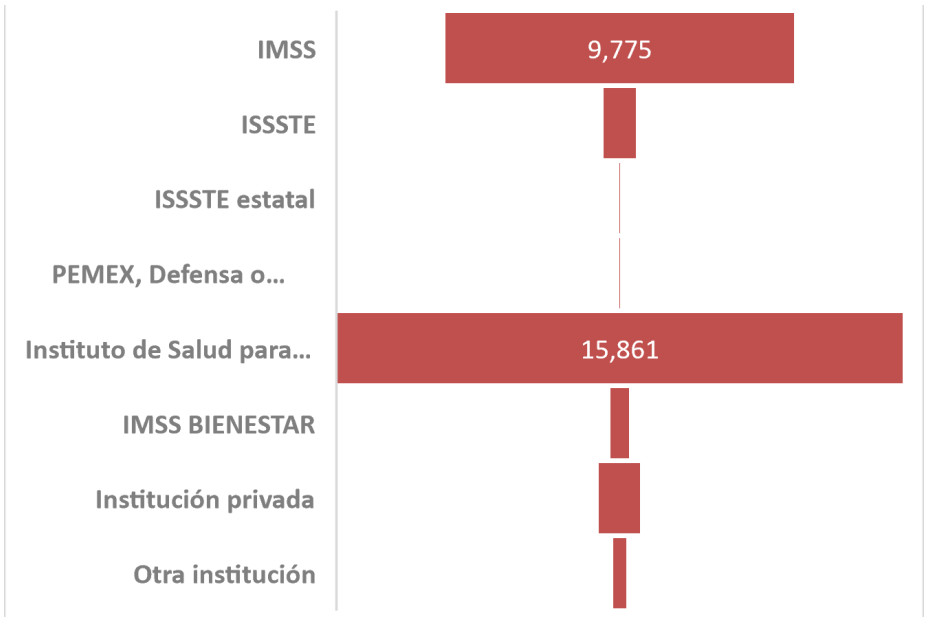
Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Como se puede observar las localidades donde existe un mayor rezago de afiliación a servicios de salud, donde el promedio de población sin servicios de salud fluctúa entre el 50% al 80%, son: La Unión (84%), Kirabo (83%), La Unión (81%), Océano Azul (75%), Cristal [Colonia](75%), Cafeto Cimarrón (73%), India Blanca (63%), Don Brígido (61%), Yax'muul [Rancho] (60%), Kilómetro Doce (58%), San Pedro (56%), Cachito de Cie-

lo (56%), Lum Ha [Lotes](56%), Balam Luum (55%), Marités (53%), Dos Palmas (50%) y Alfa y Mega (50%) (tabla 27).

De las 17 localidades señaladas, se puede observar que cuentan con pocos habitantes y se identifican como localidades del contexto rural. Su población se encuentra entre 5 y 350 habitantes aproximadamente. En contraste, localidades que también son identificadas como rurales y que si tienen un alto porcentaje de población afiliada son: Punta Sur (94%), Tankah Tres (94%), Ciudad Chemuyil (93%), Sahcab Mucuy (92%), Hondzonot (90%), Akumal Sur (87%), Cenote Calavera (86%), Chanchén Palmar (85%), Chanchén Primero (85%wel ITER (INEGI, 2020) la institución con mayor número de afiliados a servicios médicos se enumera en la Secretaría de Salud, mediante el Instituto de Salud para el Bienestar con 15, 861 personas (gráfica x), le sigue el IMSS con 9,775 y en tercer lugar instituciones privadas con 1,175 (gráfica 1).

Gráfica 1. Personas afiliadas por institución a servicios médicos en el municipio de Tulum



Fuente: INEGI (2020). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Médicos por cada 1,000 habitantes

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), al segundo trimestre de 2021, realizado por el INEGI, en México existen 305, 418 personas ocupadas como médicos, de las cuales 54% son hombres y 46% mujeres (INEGI, 2021).

Uno de los indicadores más importantes para la prestación de servicios de salud, es el de médicos por cada 1,000 habitantes. Este indicador muestra la relación entre el número de médicos en contacto directo con el paciente, por cada mil habitantes

De acuerdo con la Organización Mundial de Salud (OMS), se debe tener entre 1.2 médicos especialistas por cada cien mil habitantes; México tiene 0.07 (De la Rosa, 2022). En México el número de personas ocupadas como médicos por cada 1,000 habitantes en el país es de 2.4, valor superior al promedio de 2 médicos por cada mil habitantes de América Latina y el Caribe, pero inferior al valor promedio que señala la Organización para la cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) que es de 3.5 médicos por cada mil habitantes (INEGI, 2021).

En el caso de Quintana Roo, existen 1.3 médicos por cada 1,000 habitantes, lo anterior de acuerdo con los datos de la Secretaría de Salud (Secretaría de Salud, 2021), donde se señala que en el estado se contabilizan 2,453 médicos para una población de 1,857,985 habitantes (INEGI, 2020).

Para el municipio de Tulum, el indicador muestra que existen solo 0.3 médicos por cada 1,000 habitantes. Lo que hace indispensable dotar de mayores recursos al sector salud municipal para una mejor planeación y asistencia en caso de desastre a las ciudades.

Número de médicos por habitante 2021			
Número de médicos	15	X 1000	0.3
Población objetivo	46,721		

Fuente: Secretaría de Salud (2021). Recursos en Salud Sectorial 2021. Datos abiertos. Disponible en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/recursos-en-salud-nivel-central. Gobierno de México.

Tasa de mortalidad

Los estudios de los efectos de los desastres en la salud han demostrado que son útiles para planificar las medidas de prevención y socorro y evaluar su eficacia. La tasa de mortalidad por edades puede ayudar a identificar grupos vulnerables y poder planificar la cantidad de suministros y personal necesario.

La Tasa Bruta de Mortalidad (TBM) expresa la salida de individuos de una población debido a la mortalidad. Se considera que es baja cuando está por debajo de 10 por mil y alta si supera 15 por mil. Los países más pobres tienen una TBM alta debido a la mal nutrición y las epidemias, lo que se observa principalmente en los países menos desarrollados. En contraste, en países mejor desarrollados la TBM es baja gracias al desarrollo de la asistencia médica y la buena alimentación.

En México en 2021 fallecieron 1,122,249 personas, de las cuales 58% corresponden a hombres y 42% a mujeres (INEGI, 2021a). El grupo más vulnerable fueron las personas de 65 años y más, principalmente por la COVID-19 con un 49% (INEGI, 2021a). Por otra parte, la tasa de defunciones registrada por cada 10 mil habitantes por entidad Federativa al estado de Quintana Roo le corresponde 59 por cada 10,000 habitantes la más baja del país (INEGI, 2022).

En este apartado se presenta la Tasa Bruta de Mortalidad (TBM) para el municipio de Tulum, la cual refleja el número de defunciones ocurridas en un año por cada 1,000 habitantes. El registro de fallecimientos, en las estadísticas de mortalidad del INEGI, señalan que para el municipio de Tulum fueron 215 personas para 2021 (INEGI, 2021b). Por su parte, el Consejo Nacional de Población (CONAPO) en sus estadísticas de proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015-2030 (base 2), señala que la población a mitad de año para el municipio fue de 37,689 personas (CONAPO, 2019).

El cálculo para la TBM para el municipio de Tulum arroja un resultado de 5.7 defunciones por cada 1,000 habitantes en 2021, una tasa baja de fallecimientos.

Tasa Bruta de Mortalidad 2021			
Defunciones registradas en un año	215	X 1000	5.7
Población a mitad de año 2021	37,689		

Fuente: INEGI (2021a). Estadísticas de Defunciones Registradas 2021. Mortalidad. Cuéntame. Población de México; CONAPO (2019). Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015-2030 (base 2).

De la misma manera, uno de los más importantes indicadores sanitarios es la mortalidad infantil que tiene en cuenta los fallecidos en el primer año de vida, los refiere al número total de recién nacidos vivos en una población para un periodo de tiempo determinado.

Debido a la importancia que tiene la fecha de muerte en este primer año de vida se analizan diferentes tipos de tasas, entre las que se encuentra la Tasa de Mortalidad Infantil (TMI), es decir, la estadística para los fallecidos en el primer año de vida o la probabilidad que tiene un recién nacido de morir antes de cumplir un año de vida.

A partir de los datos proporcionados por el Subsistema de Información Demográfica y Social del INEGI (https://www.inegi.org.mx/programas/natalidad/#Tabulados) se calculó la TMI para 2021 del municipio. El número de defunciones registradas para menores a un año de vida fue 7 y el número de nacidos vivos para ese mismo año fue de 535, lo que da una tasa de 13.08 por cada 1000 habitantes. Lo que significa que por cada mil niños que nacen en el municipio de Tulum mueren alrededor de 13 antes de cumplir su primer año de vida.

Dado que la mayoría de las muertes en menores de un año son prevenibles, se considera un indicador de la calidad de vida y bienestar de una población y es imprescindible como indicador de monitoreo del derecho a la salud.

Tasa de Mortalidad Infantil 2021			
Número de defunciones registradas en menores de un año	7	X 1000	13.08
Número de nacidos vivos	535		

Fuente: INEGI (2021b) Subsistema de Información Demográfica y Social. Mortalidad. INEGI (2021c) Subsistema de Información Demográfica y Social. Natalidad.

4.3.2.5. Pobreza

En México se cuenta con tres apreciaciones de los indicadores de la medición multidimensional de la pobreza en el tiempo a escala municipal. Estas evaluaciones se han realizado por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) y da a conocer los resultados de la medición de pobreza a nivel municipal 2020 y su comparativo con los años 2010 y 2015, lo que permite observar la evolución de la pobreza a este nivel de desagregación.

Desde su sitio de internet el CONEVAL señala que la Ley General de Desarrollo Social (LGDS) en su artículo 37 instaura que es este Consejo el que deberá estimar la pobreza con una periodicidad mínima de dos años para cada entidad federativa y, a nivel municipal, cada cinco años con información generada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través de censos, conteos y encuestas. Lo que brinda la posibilidad de identificar los cambios ocurridos en materia de pobreza a lo largo de una década. Asimismo, también se señala que las estimaciones sobre pobreza en los municipios de México constituyen una herramienta primordial que apoya y fortalece la planeación y la evaluación de la política de desarrollo social en el país.

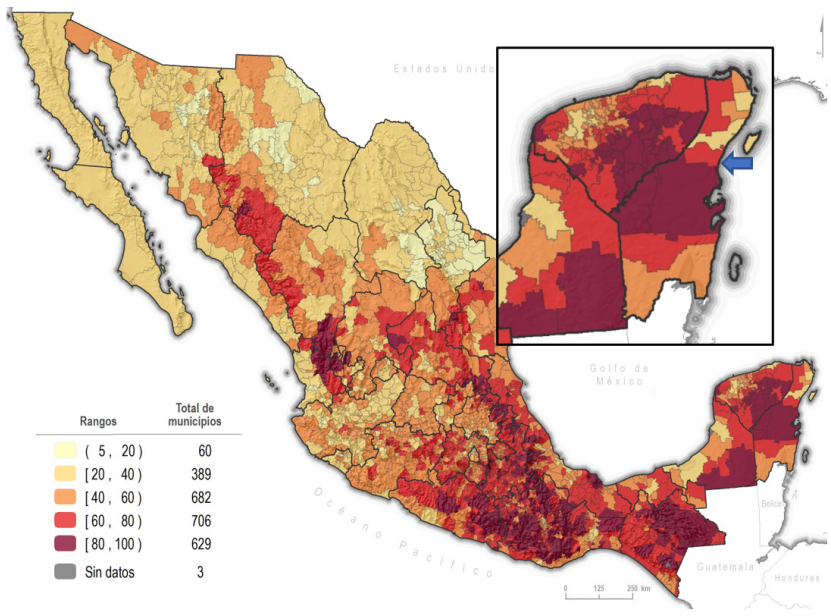
De acuerdo con el CONEVAL se puede clasificar a la pobreza en pobreza y pobreza extrema. La primera se define como "una persona se encuentra en situación de pobreza cuando no tiene garantizado el ejercicio de al menos uno de sus derechos para el desarrollo social y si sus ingresos son insuficientes para adquirir los bienes y servicios que requiere para satisfacer sus necesidades alimentarias y no alimentarias" (CONEVAL, s.f.). Y la segunda como "una persona se encuentra en situación de pobreza extrema cuando no tiene garantizado el ejercicio de al menos tres de los derechos constitutivos para el desarrollo social y sus ingresos sean inferiores a la línea de pobreza extrema por ingresos" (CONEVAL, s.f.).

La diversidad social, económica y geográfica del territorio hace necesaria la existencia de información a diferentes escalas y dimensiones para comprender la dinámica del fenómeno de la pobreza al interior de las entidades federativas y sus municipios.

Con los resultados de 2020, en general, se observa una mayor concentración de la pobreza en algunas zonas específicas, para el caso del municipio de Tulum se puede observar en la figura 26 que el porcentaje de población en situación de pobreza se encuentra en el rango de 60 a 80%.

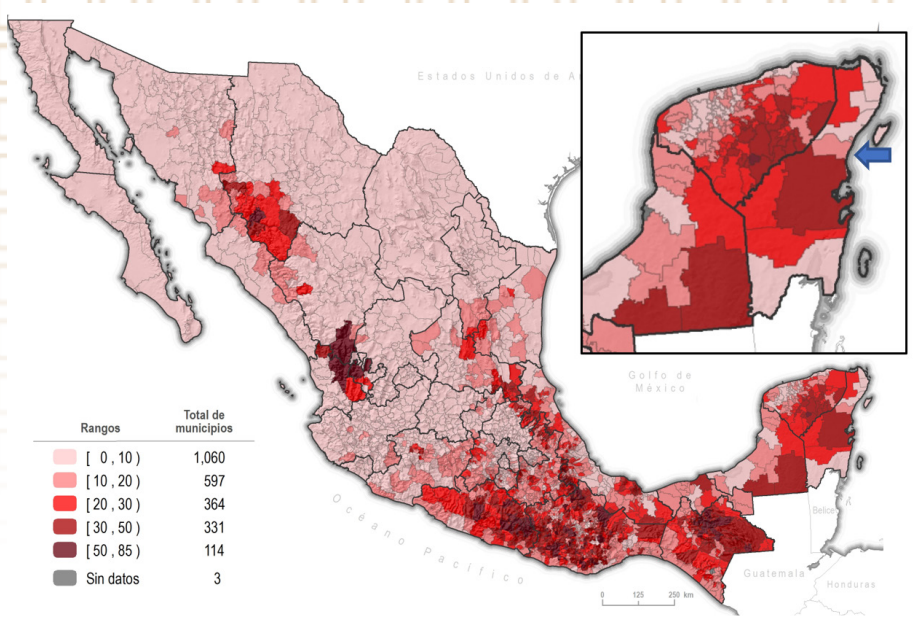
Ahora bien, en el país existen zonas donde se registran mayores rezagos socioeconómicos, como se puede observar en la figura 27. En esta figura podemos identificar que para el municipio de Tulum el indicador de pobreza extrema se sitúa en el rango del 10 al 20% de su población, por lo que existe aún un porcentaje de personas que viven en situación de extrema pobreza hoy en día en el municipio de Tulum.

Figura 26. Porcentaje de población en situación de pobreza, según municipio, México, 2020



Fuente: CONEVAL (s.f.). Medición de la pobreza. Pobreza a nivel municipio 2010-2020. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx

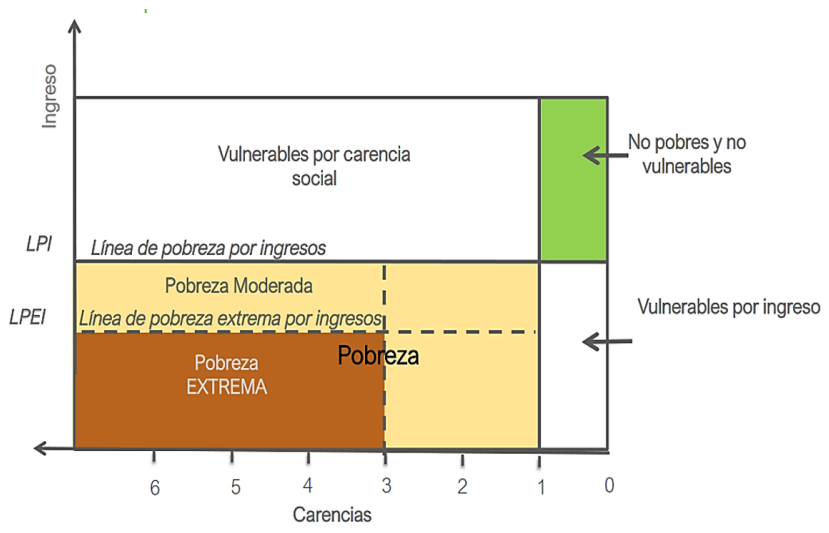
Figura 27. Porcentaje de población en situación de pobreza extrema, según municipio, México, 2020



Fuente: CONEVAL (s.f.). Medición de la pobreza. Pobreza a nivel municipio 2010-2020. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx

De acuerdo con la metodología usada por el CONEVAL para la medición de la pobreza, se entiende que existen personas con pobreza moderada, las cuales tiene de 1 a 3 carencias sociales, en contraste tenemos que cuando las carencias son mayores a 3 hablamos de pobreza extrema (figura 28). Éstas carencias se encuentran contenidas en tres grandes dimensiones: 1) Bienestar Económico medido por el ingreso; 2) Derechos Sociales (rezago educativo, servicios de salud, seguridad social, calidad y espacios de la vivienda, servicios básicos de la vivienda y alimentación); y 3) Contexto Territorial (cohesión social).

Figura 28. Metodología para la medición multidimensional de la pobreza

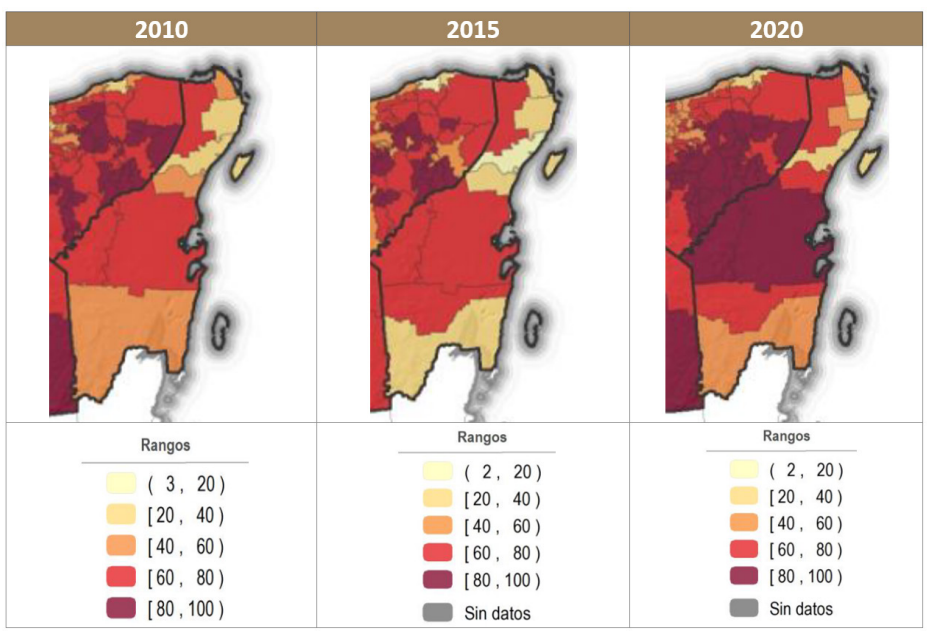


Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020.

A partir de los resultados de la medición multidimensional de la pobreza a nivel municipal CONEVAL pone a disposición de los gobiernos la posibilidad de visualizar las carencias sociales y la situación de pobreza en la que se encuentran y el cambio que esta presenta para los periodos de 2010, 2015 y 2020.

De lo anterior, se presentan las variaciones en la población del municipio de Tulum en cuanto a pobreza, pobreza moderada, pobreza extrema y población vulnerable por carencias sociales (figuras 29 a 32).

Figura 29. Porcentaje de población en situación de pobreza.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010 y 2020 INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Como se puede observar en la figura 29, el municipio de Tulum en 2010 muestra que de un 40% a 60% de la población se encuentra en situación de pobreza, para 2015 este porcentaje disminuye al rango anterior (entre 20% y 40%), sin embargo, el porcentaje para 2020 es mayor, situándolo entre el 60 y 80%.

Para datos más puntuales en la tabla 28 el año 2010 expone un porcentaje de población en situación de pobreza del 45.31% (12,709 personas) de un total de 28,049 habitantes para ese año (INEGI, 2020). En 2015 se observa una disminución, sin embargo, hay que tener presente que este año se basa solo en un conteo y no en un censo, por eso en 2020 este porcentaje aumenta al 61.81% de población en situación de pobreza.

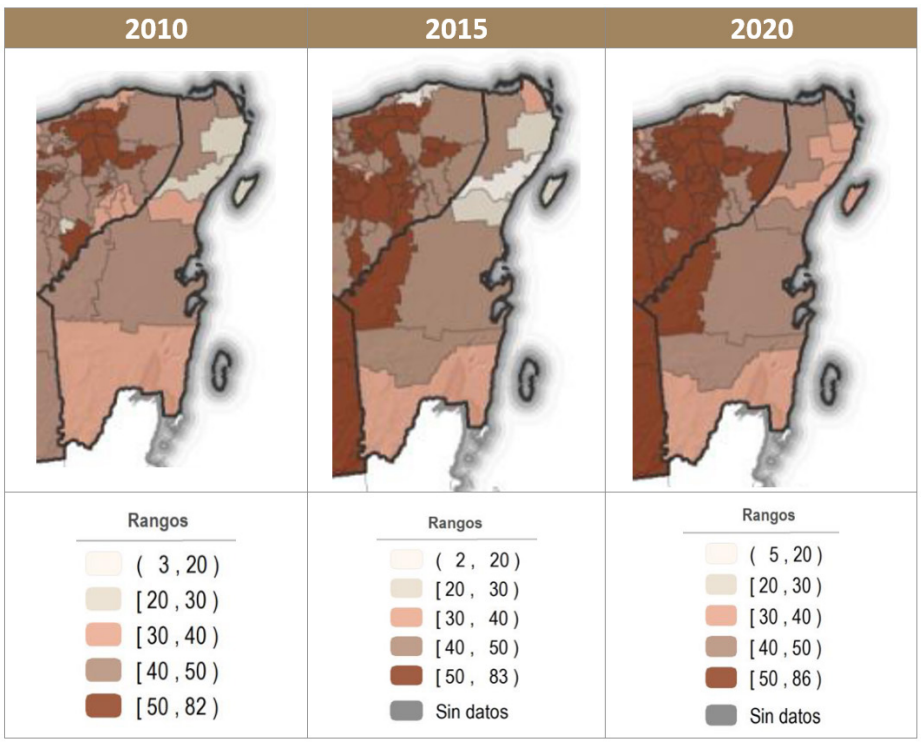
Tabla 28. Pobreza municipio de Tulum

Pobreza								
Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
45.31	32.21	61.81	12,709	12,366	28,542	2.63	2.48	2.61

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

El siguiente indicador presentado es el de pobreza moderada (figura 30). En la figura se simboliza que el porcentaje de población del municipio de Tulum viviendo en pobreza moderada ha variado con los años, para 2010 el rango se encuentra entre el 30% y 40%, disminuyendo para 2015 al rango entre el 20% y 30%, y en 2020 vuelve a incrementarse entre un rango del 40% y 50%, de una población total para ese año de 46,180 personas (INEGI, 2020).

Figura 30. Porcentaje de población en situación de pobreza moderada, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Ahora bien, para conocer los datos puntuales correspondientes al municipio para pobreza moderada, se puede observar en la tabla 29 que para el primer año analizado (2010) la cantidad de población fue de 9,981 personas (35.58%) con un promedio de carencias sociales de 2.35%. Para 2015 disminuye en porcentaje al 26.87% para incrementarse en 2020 al 43.01%, es decir, 19,861 personas de un total de 46,180 para ese año, sin embargo, el promedio de carencias sociales sigue disminuyendo.

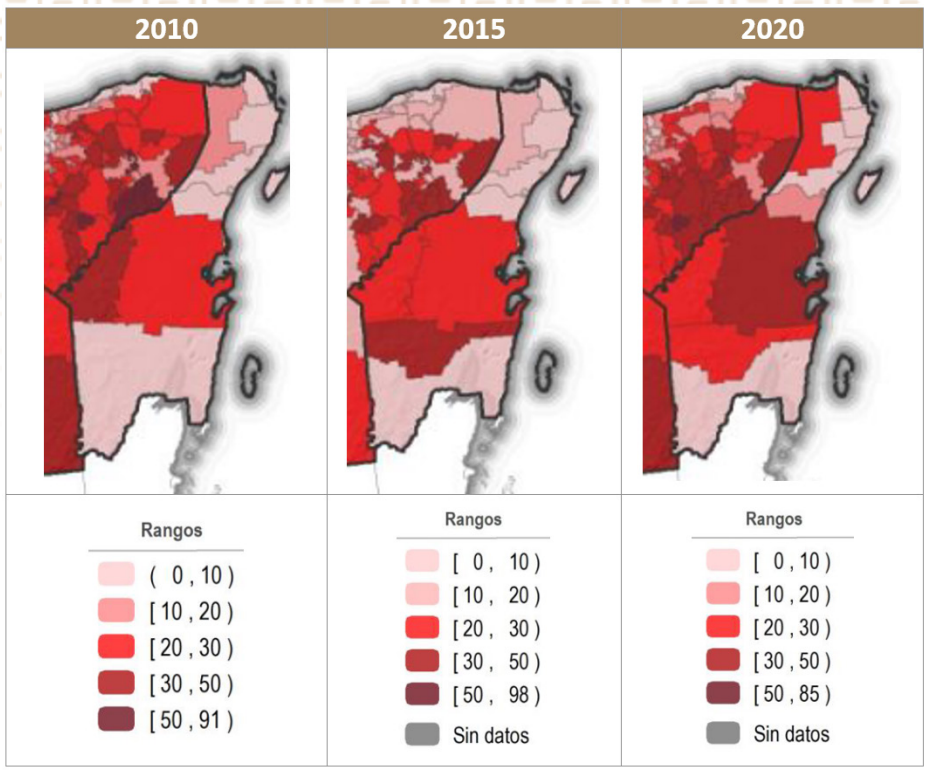
Tabla 29. Pobreza moderada municipio de Tulum

Pobreza moderada								
Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
35.58	26.87	43.01	9,981	10,315	19,861	2.35	2.30	2.19

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

En la figura 31, el indicador representado es el de pobreza extrema, uno de los más importantes para que los gobiernos conozcan cuanta población tiene una gran carencia de acceso a servicios e ingresos. Para los años 2010 y 2015 el porcentaje se encuentra entre 0 al 10% y para 2020 esta población incrementó entre el 20% y 30%, es decir la población que vive en pobreza extrema para ese año fueron 8,682 personas (tabla 30).

Figura 31. Porcentaje de población en situación de pobreza extrema, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

La pobreza extrema es la falta de recursos de una persona para satisfacer sus necesidades básicas. En este sentido, un 18.80% de la población del municipio tiene tres o más carencias de las seis posibles. Estas personas se encontraban por debajo de la línea de bienestar en 2020 (tabla 30).

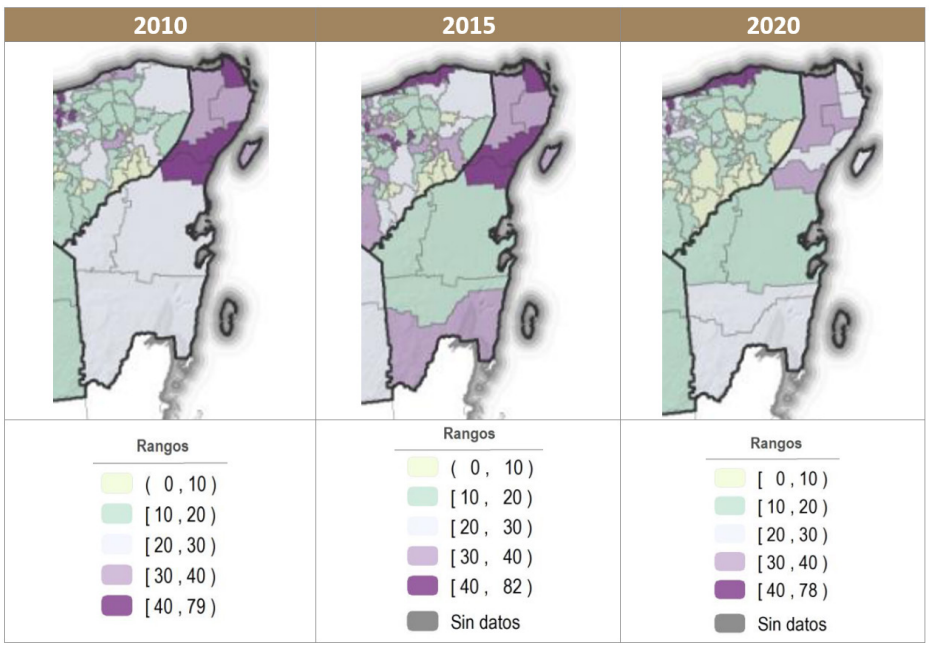
Tabla 30. Pobreza extrema municipio de Tulum

Pobreza extrema								
Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
9.73	5.34	18.80	2,728	2,051	8,682	3.66	3.37	3.58

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

De acuerdo con la metodología para la medición multidimensional de la pobreza realizada por el CONEVAL (2021) la población que presenta una o más carencias sociales, pero cuyo ingreso es superior a la línea de bienestar, es población vulnerable por carencias sociales. Las carencias sociales pueden ser seis: 1) por rezago educativo; 2) por acceso a los servicios de salud; 3) por acceso a seguridad social; 4) por calidad y espacios de la vivienda; 5) por servicios básicos en la vivienda y 6) por acceso a la alimentación. Estas son las que han presentado en tres años el mayor número de municipios con más de la mitad de su población en esta condición (CONEVAL, 2021). A continuación, se exponen la información recabada para el municipio de Tulum (figura 20 y tabla 31).

Figura 32. Población vulnerable por carencias sociales.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

La figura 20 muestra que el municipio de Tulum en 2010 contaba con un porcentaje entre el 40% y 79% de población vulnerable por carencias sociales, para 2015 se sigue encontrando en el rango más alto, ahora bien, para 2020 disminuye entre el 30% y 40%.

En efecto, el porcentaje de la población pasó del 44.19, 58.21 y 30.04 entre 2010, 2015 y 2020, respectivamente (tabla 31). Entre 2010 y 2020, años donde se realizaron Censos de Población, pasó de 12,395 a 13,870 personas. El promedio de carencias sociales para el último año analizado se situó en 1.94 (tabla 31).

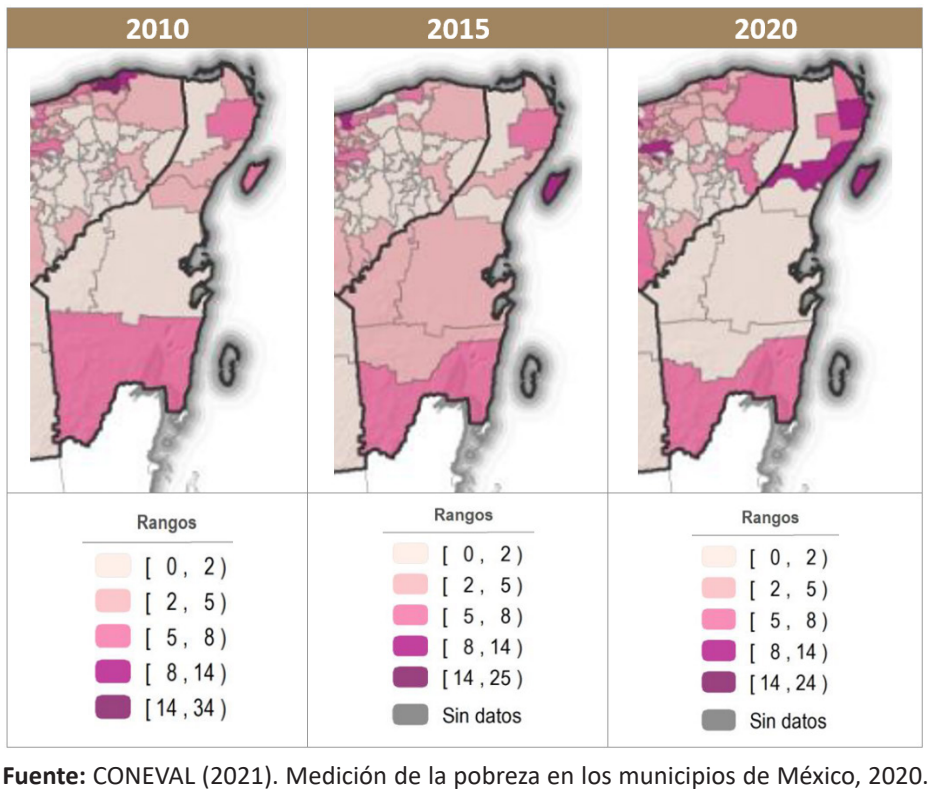
Tabla 31. Población vulnerable por carencia social municipio de Tulum

Vulnerables por carencia social								
Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
44.19	58.21	30.04	12,395	22,347	13,870	2.15	2.00	1.94

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

Por otro lado, también se contabiliza a la población vulnerable por ingresos, que es la población que no presenta carencias sociales pero cuyo ingreso es inferior o igual a la línea de bienestar (CONEVAL, 2021). Para el municipio de Tulum el porcentaje en 2010 se encontraba entre el 2% y 5%, en 2015 y 2020 disminuye de rango quedando entre el 0 y 2% (figura 33).

Figura 33. Población vulnerable por ingresos, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Por lo tanto, las cifras para el municipio de la población vulnerable por ingreso en porcentaje y personas son 2.09% (586) para 2010; 0.96% (368) para 2015; y 1.95% (900) para 2020. Si bien se observa un aumento en esta vulnerabilidad 900 personas solo representan menos del 2% de la población total del municipio (tabla 32).

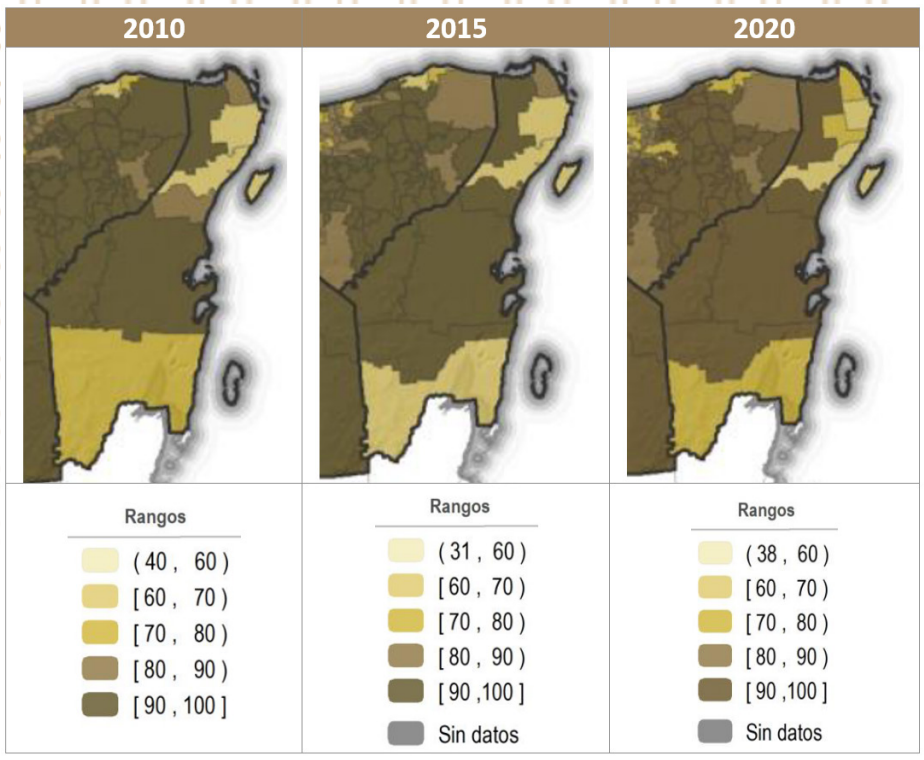
Tabla 32. Población vulnerable por ingreso municipio de Tulum

Vulnerables por ingreso					
Porcentaje			Personas		
2010	2015	2020	2010	2015	2020
2.09	0.96	1.95	586	368	900

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

De la misma manera, en la figura 34 se muestra el porcentaje de población que vive con al menos una carencia social, que en 2010 era entre el 80 y 90 porciento vivían con esa condición, para 2015 y 2020 esta situación se ha incrementado llegando al 90% y 100% de personas. Lo que significa que existen un gran porcentaje de personas que no cuentan o tienen acceso a un derecho social en el municipio de Tulum.

Figura 34. Población con al menos una carencia social, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

En la tabla 33 se puede observar que para 2020 el municipio de Tulum contaba con 42,413 personas viviendo con al menos una carencia social (91.84% del total), situación que se ha ido incrementando desde 2010 (figura 22 y tabla 33).

Tabla 33. Población con al menos una carencia social municipio de Tulum

Población con una carencia social								
Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
89.50	90.43	91.84	25,104	34,713	42,413	2.39	2.17	2.39

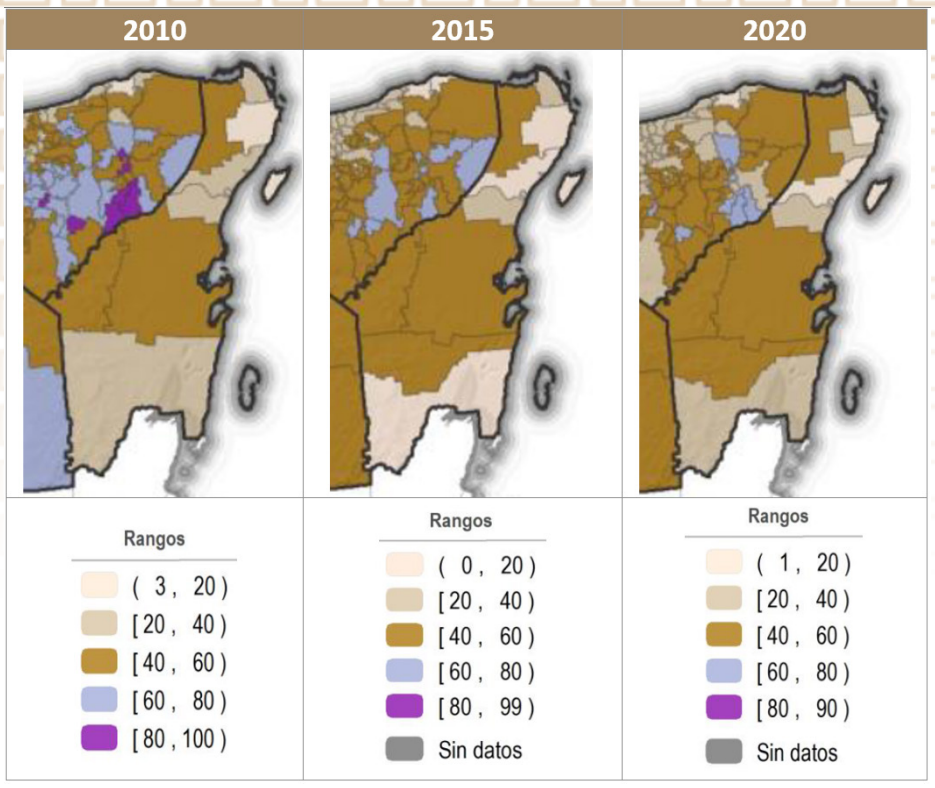
Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

Debe considerarse que la evolución de la pobreza y sus carencias se explica en gran medida por el crecimiento y desarrollo económico del país (Huerta Pineda, 2016), en este sentido el crecimiento de Tulum los últimos años ha sido exponencial. Tampoco debe atribuirse que la evolución de las carencias sociales se debe a la limitación en el presupuesto de los programas federales, ya que existen otros programas de orden estatal o municipal, así como fondos de otros ramos federales con objetivos similares.

Por otra parte, también se contabiliza a la población con al menos tres carencias sociales de las seis que se analizan. En la figura 35 se puede observar que en el municipio de Tulum los tres periodos analizados no tuvieron variación alguna, estando en el rango de 20% al 40%. En un contexto de bajo crecimiento económico y limitación por parte de la federación en gasto público, es importante que para la toma de decisiones en la aprobación del presupuesto de egresos para los municipios también se considere la evolución de las carencias sociales.

Los programas de apoyo tienen una contribución directa en abatir las carencias sociales, la conceptualización de la pobreza ha migrado a una perspectiva de múltiples dimensiones. Sin embargo, es complejo saber qué dimensiones considerar, los valores para definir, las ponderaciones asignadas y el número de dimensiones (Vela et al., 2015).

Figura 35. Población con al menos tres carencias sociales.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Es por esa razón que las personas que viven con al menos tres carencias sociales no tienen el mismo peso en cada una de las localidades del municipio. Si bien es menor la cifra de población para 2020 (16,933 personas) que la de una carencia, aún es un porcentaje significativo del casi 37% (tabla 34).

Tabla 34. Población con tres carencias sociales municipio de Tulum

Población con tres carencias sociales								
Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
37.62	32.31	36.67	10,552	12,403	16,933	3.50	3.33	3.52

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

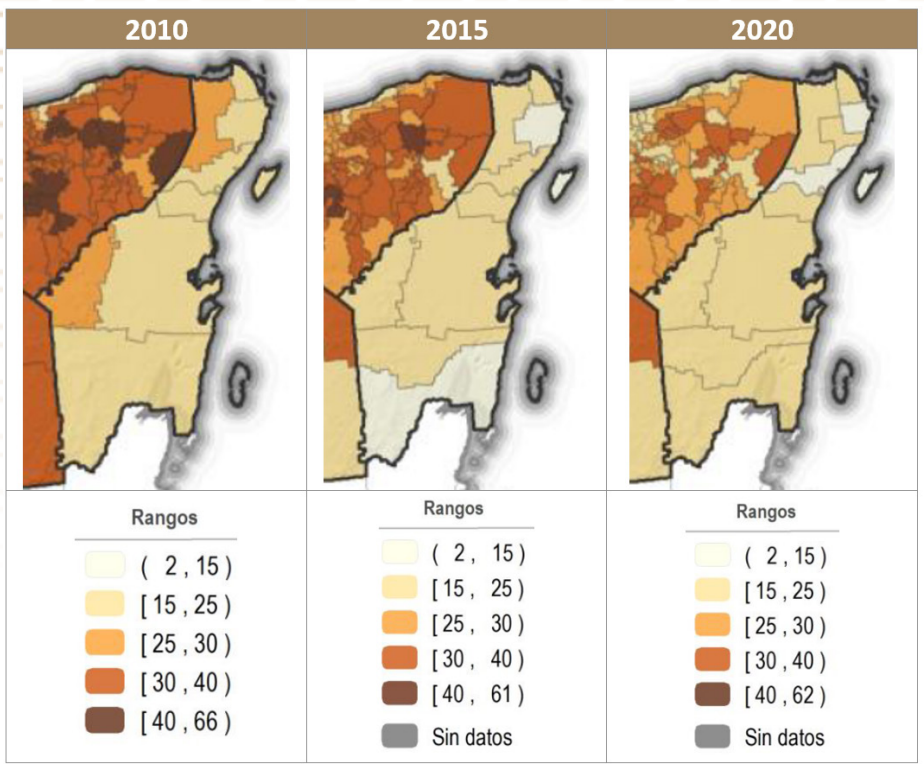
El CONEVAL, también muestra una serie de indicadores de privación social para los municipios de México, 2020. De estos resultados, se muestran los correspondientes al municipio de Tulum también clasificados en tres periodos de tiempo (figuras 24 a 28).

Para lo anterior se toman en consideración al menos los siguientes indicadores: ingreso corriente per cápita, rezago educativo promedio en el hogar, acceso a los servicios de salud, acceso a la seguridad social, calidad y espacios de la vivienda, acceso a los servicios básicos en la vivienda, acceso a la alimentación y grado de cohesión social (CONEVAL, 2021). A continuación, se exponen los resultados por cada uno de los indicadores de derechos sociales para el municipio de Tulum (CONEVAL, 2021), clasificados en tres periodos de tiempo (figuras 36 a 40).

Rezago educativo: La Norma de Escolaridad Obligatoria del Estado Mexicano (NEOEM) establece que la población con carencia por rezago educativo es aquella que tenga de tres a quince años, y que no cuenta con la educación básica obligatoria y no asiste a un centro de educación formal. Que nació antes de 1982 y no cuenta con el nivel de educación obligatoria vigente en el momento en que debía haberla cursado (primaria completa). Y que nació a partir de 1982 y no cuenta con el nivel de educación obligatoria (secundaria completa).

El municipio de Tulum entre 2010 y 2015 se mantiene con el mismo porcentaje de personas (de 15% a 25%) para 2020 se mantiene en la misma proporción quedando en el mismo rango (figura 36).

Figura 36. Población con rezago educativo.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

En la tabla 35, se puede observar que de 22.72% para 2010 disminuye al 18.68% para 2020. Si bien en porcentaje se observa disminución, en número de personas no, pero hay que tomar en cuenta el crecimiento poblacional del municipio.

Tabla 35. Porcentaje de población por carencia social Rezago Educativo municipio de Tulum

Porcentaje			Carencias (promedio)			Personas		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
22.72	18.34	18.68	6,374	7,040	8,626	3.28	3.07	3.36

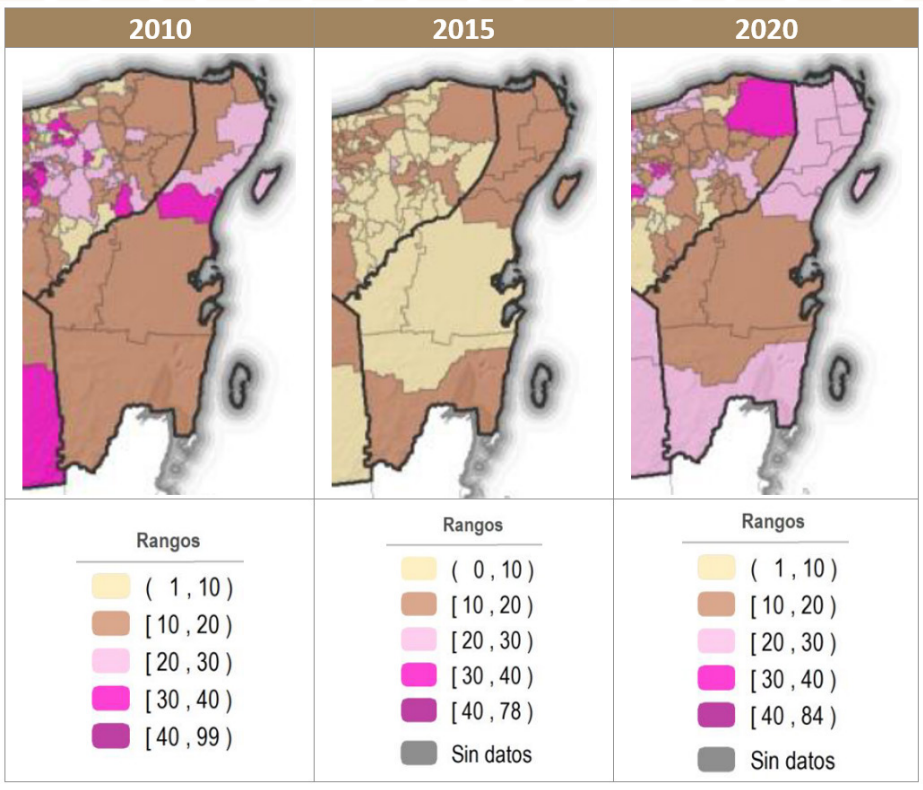
Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

Acceso a Servicios de Salud: En la Constitución, en su Artículo 4° se establece que toda la población mexicana tiene derecho a la protección de la salud. En términos de la Ley General de Salud (LGS), se refiere al derecho de todos los mexicanos a ser incorporados al Sistema de Protección Social en Salud (CONEVAL, 2021).

A partir de estos criterios, se considera que una persona se encuentra en situación de carencia por acceso a los servicios de salud cuando: No cuenta con adscripción o derecho a recibir servicios médicos de alguna institución que los presta, incluyendo el Seguro Popular, las instituciones públicas de seguridad social (IMSS, ISSSTE federal o estatal, Pemex, Ejército o Marina) o los servicios médicos privados.

Para el municipio de Tulum el indicador señala que en 2010 no tenían acceso a servicios de salud entre el 30% y 40% de la población. Lo anterior cambia para 2015 donde se muestra solo de un 10% a un 20% con esta carencia, es hasta 2020 que el porcentaje alcance entre un 20% a un 30% (figura 37).

Figura 37. Población con carencia por acceso a los servicios de salud.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

De acuerdo con los datos más puntuales, se puede observar que en 2010 eran 9,353 personas con esta carencia, disminuyendo para 2015, pero aumentando de nuevo para 2020 a 13,195 personas (tabla 36). La disminución se puede distinguir mejor en el porcentaje que pasó en 2010 de 33.35% a 28.57% en 2020.

Tabla 36. Porcentaje de población por carencia social Acceso a Servicios de Salud municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
33.35	17.12	28.57	9,353	6,570	13,195	2.93	2.69	3.23

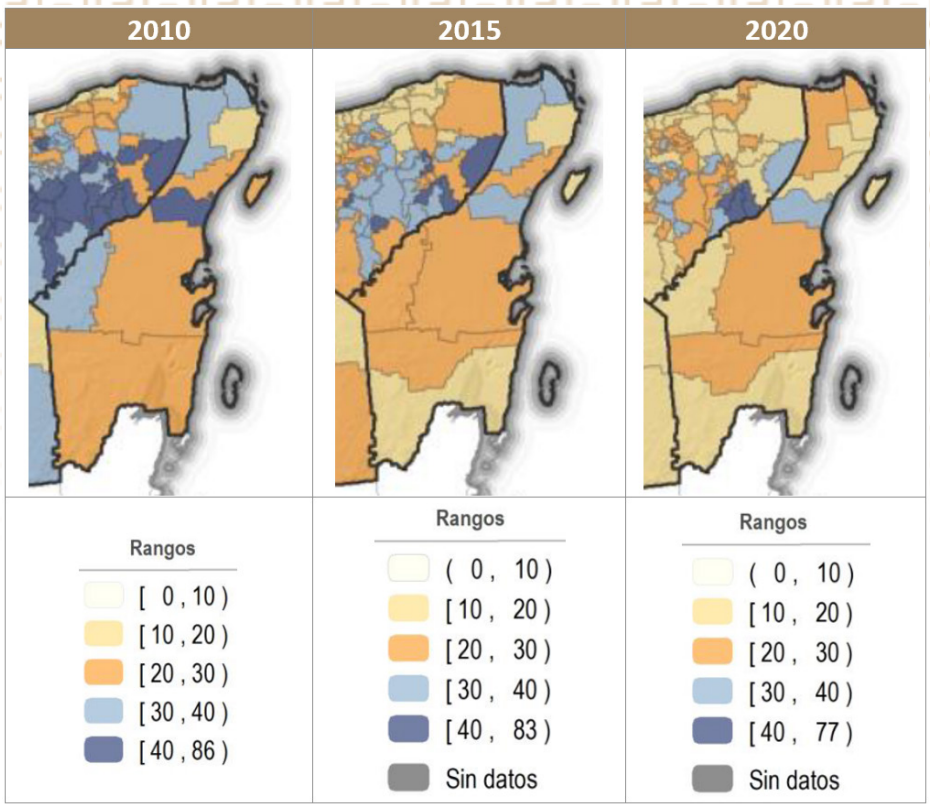
Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

Calidad y espacios de la vivienda: CONEVAL (2021) señala que la Constitución en su Artículo 4° establece el derecho de toda familia a disponer de una vivienda digna y decorosa; sin embargo, ni en este ordenamiento ni en la Ley de Vivienda se especifican las características mínimas que debe tener ésta.

Los criterios formulados por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) para el indicador de calidad y espacios de la vivienda señalados en la página del CONEVAL (s.f.) se incluyen dos subdimensiones: el material de construcción de la vivienda y sus espacios. De acuerdo con estos criterios, se considera como población en situación de carencia por calidad y espacios de la vivienda a las personas que residan en viviendas que presenten, al menos, una de las siguientes características:

- El material de los pisos de la vivienda es de tierra.
- El material del techo de la vivienda es de lámina de cartón o desechos.
- El material de los muros de la vivienda es de barro o bajareque; de carrizo, bambú o palma; de lámina de cartón, metálica o asbesto; o material de desecho.
- La razón de personas por cuarto (hacinamiento) es mayor que 2.5.

Figura 38. Población con carencia por calidad y espacios en la vivienda, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021), Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Se advierte en la figura 38 que el porcentaje de población que vive en carencia por calidad y espacios en la vivienda para Tulum fue en 2010 entre el 40% y 86%, para 2015 disminuye quedando entre el 30% y 40%, manteniendo este rango para 2020.

Tabla 37. Porcentaje de población por carencia social Calidad y espacios de la vivienda municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
47.81	39.33	33.35	13,410	15,099	15,401	2.82	2.73	3.19

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

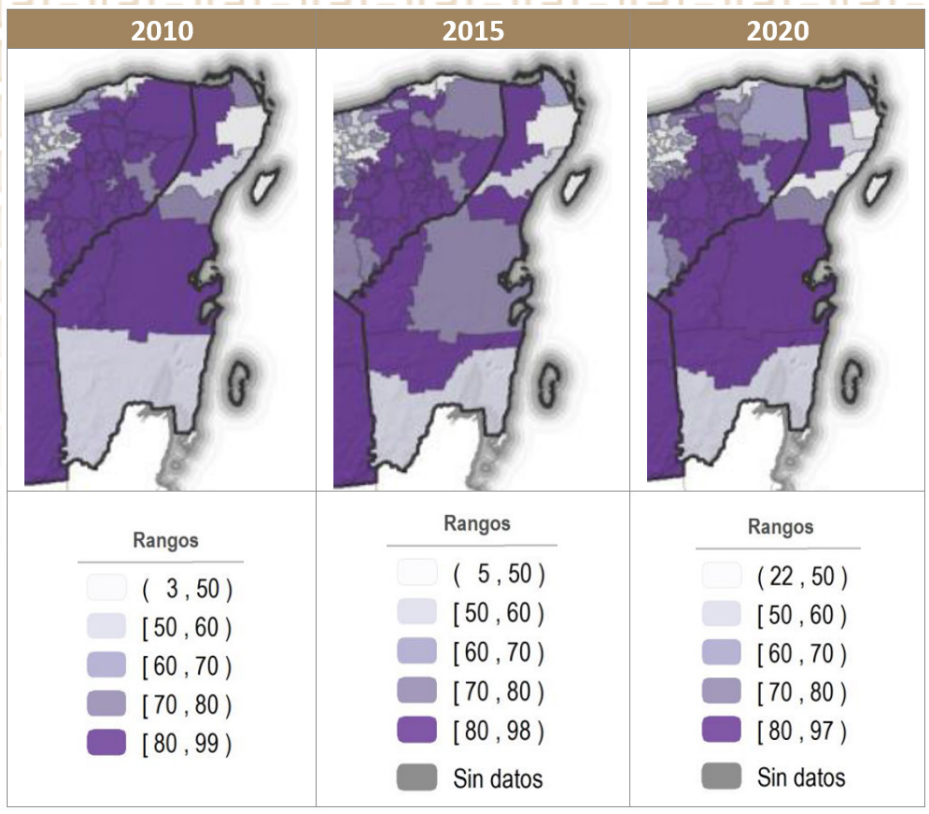
En la tabla 37 el total de personas con la carencia de calidad y espacios de la vivienda que se puede notar es de 13,410 (47.81%) para 2010, 15,099 (39.33%) para 2015 y 15,401 (33.35%) para 2020. Lo anterior reitera lo que la cartografía nos muestra en la figura 26.

Acceso a la seguridad social: se refiere al "conjunto de mecanismos diseñados para garantizar los medios de subsistencia de los individuos y sus familias ante eventualidades, como accidentes o enfermedades, ante circunstancias socialmente reconocidas, como la vejez y el embarazo" (CONEVAL, s.f.). El indicador considera diferentes posibilidades de acceso, para lo cual se establecieron los siguientes criterios:

- No es personal asalariado
- No dispone de servicios médicos como prestación laboral o por contratación voluntaria al régimen obligatorio del IMSS y, además, cuenta con SAR o Afore.
- No goza de alguna jubilación o pensión o es familiar de una persona dentro o fuera del hogar con acceso a la seguridad social.
- En edad de jubilación no es beneficiario de algún programa social de pensiones para adultos mayores.

En la figura 39 podemos distinguir que el municipio de Tulum la población con esta carencia era de un 70 a 80 por ciento del total para 2010. Para 2015 se percibe un aumento al pasar a la siguiente clase mayor indicando que entre un 80% a 98% de la población se encontraba con esta carencia. Sin embargo, para 2020 a Tulum se le sitúa de nuevo entre la clase de 70% a 80%.

Figura 39. Población con carencia por acceso a la seguridad social, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Ahora bien, en la tabla 38, se advierte que de 2010 a 2020 la población que vivían con esta carencia ha aumentado, no obstante, hay que tomar en cuenta el crecimiento del municipio de Tulum. Los programas que más han apoyado para minimizar esta carencia son: Programa de Apoyo al Empleo (PAE) y Pensión para el Bienestar de las Personas Adultas Mayores (CONEVAL, s.f.).

Tabla 38. Porcentaje de población por carencia social Acceso a la seguridad social municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
77.14	80.31	72.83	21,636	30,830	33,632	2.56	2.26	2.62

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

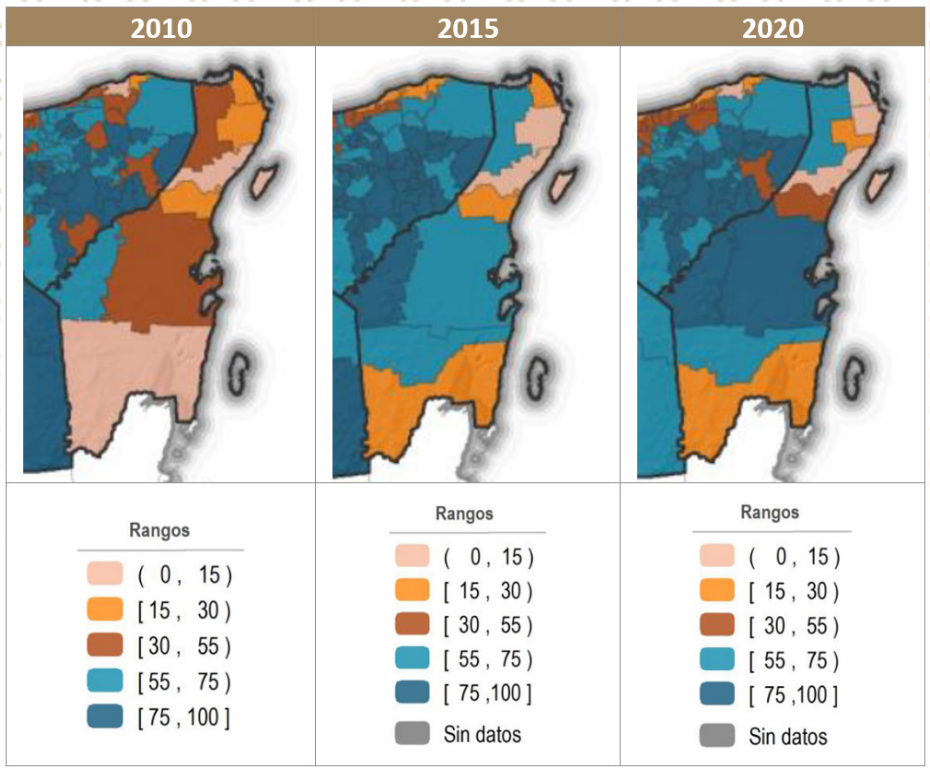
Acceso a servicios básicos en la vivienda: Como ya se mencionó, en la Constitución en su Artículo 4º se menciona el derecho de toda familia a disponer de una vivienda digna y decorosa, sin embargo, no se especifican las características de ésta.

De acuerdo con los criterios propuestos por la CONAVI (CONEVAL, s.f.), se considera como población en situación de carencia por servicios básicos en la vivienda a las personas que residan en viviendas que presenten, al menos, una de las siguientes características:

- El agua se obtiene de un pozo, río, lago, arroyo, pipa; o bien, el agua entubada la obtienen por acarreo de otra vivienda, o de la llave pública o hidrante.
- No cuentan con servicio de drenaje, o el desagüe tiene conexión a una tubería que va a dar a un río, lago, mar, barranca o grieta.
- No disponen de energía eléctrica.
- El combustible que se usa para cocinar o calentar los alimentos es leña o carbón sin chimenea.

En la figura 40 se expone que en 2010 y 2015 de la población total un 15% a un 20% de personas vivían bajo esta carencia. La variación se observa en 2020 ya que el porcentaje de población para ese año incrementa entre el 30% y 55%.

Figura 40. Población con carencia por acceso a los servicios básicos de la vivienda, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

En la tabla 39 se indican las cifras exactas de acuerdo con el CONEVAL (2021a), en la cual se muestra que para 2010 el porcentaje de población con esta carencia fue del 17.72%; para 2015 el 28.61% y para 2020 del 38.07%.

Tabla 39. Porcentaje de población por carencia social Acceso a servicios básicos en la vivienda municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
17.72	28.61	38.07	4,971	10,981	17,578	3.41	3.05	3.08

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

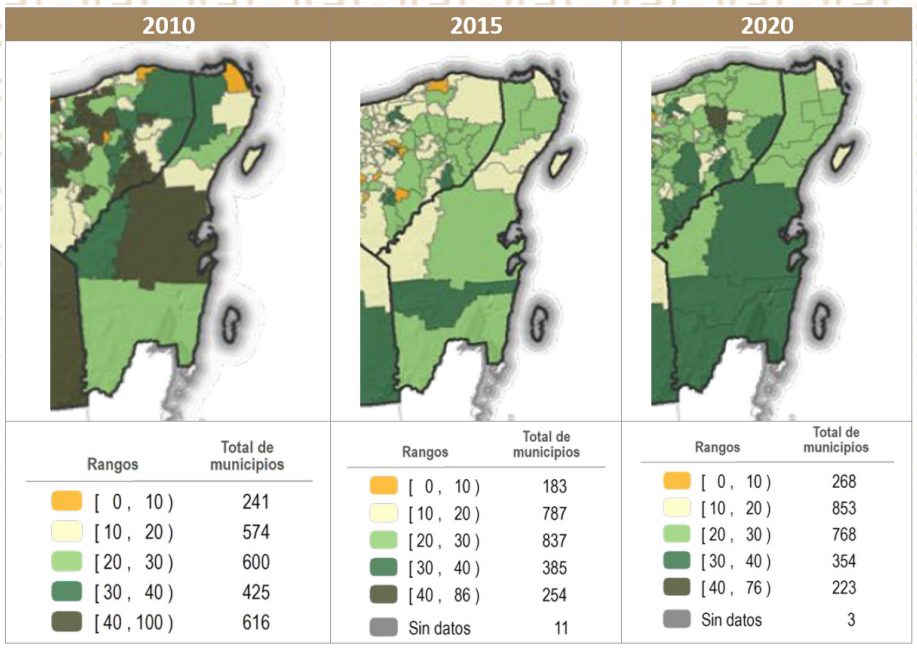
Acceso a la alimentación: Esta carencia intenta reflejar a las personas que de alguna manera ven vulnerado su derecho a la alimentación, para lo cual se guía en el concepto de seguridad alimentaria; que "comprende el acceso a comida suficiente para llevar una vida activa y sana" (https://www.coneval.org.mx/).

Para medir el indicador se utiliza una escala que considera cuatro niveles de inseguridad alimentaria: severa, moderada, leve y seguridad alimentaria. Consecuentemente, se considera que una persona está en carencia por acceso a la alimentación si presenta un grado de inseguridad alimentaria de moderado o severo.

En la figura 40 se observan los resultados para este indicador para 2010, 2015 y 2020. En la tabla 39 se muestran las cifras calculadas para estos tres periodos de tiempo.

En 2010 el municipio de Tulum obtuvo una condición para este indicador entre el 10% y 20%. Para 2015, se sitúa en la misma clase, sin cambio para esta carencia social. Por otra parte, en 2020, esta carencia incrementó, quedando en la tercera clase entre los valores del 20% y 30%, es decir, casi el 30% de la población municipal para ese año presenta un grado de inseguridad alimentaria moderado o severo (tabla 40).

Figura 41. Población con carencia por acceso a la alimentación, Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

Como ya se mencionó en la tabla 40, se puede distinguir el porcentaje y número de personas con la carencia de acceso a la alimentación. Se advierte que para 2010 eran 4,300 personas viviendo con esta carencia (15.33%); 4,854 (12.65%) y 13,014 (28.18%) para 2015 y 2020, respectivamente.

Tabla 40. Porcentaje de población por carencia social Acceso a la alimentación municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
15.33	12.65	28.18	4,300	4,854	13,014	3.77	3.13	2.32

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

Finalmente, se puede señalar que para el municipio de Tulum la carencia más significativa es la de acceso a seguridad social (tabla 38) con el 72.83% para 2020, de ahí la segunda carencia en orden de importancia sería acceso a los servicios básicos en la vivienda (38.07% ver tabla 38) y en tercer lugar la carencia acceso por calidad y espacios en la vivienda (tabla 36).

Por otro lado, hay indicadores que aumentaron en proporción de un periodo a otro, como por ejemplo el de acceso a los servicios básicos en la vivienda que paso de 17.72% en 2010 a 38.07% en 2020. También es el caso de carencia por acceso alimentación que paso de 15.33% a 28.18% entre 2010 y 2020 (tablas 39 y 37).

Si bien, unos aumentaron también se observa disminución en otros, por ejemplo, en rezago educativo de 22.72% a 18.68% entre 2010 y 2020; otro indicador es el de acceso a servicios de salud (tabla 35) que paso de 33.35% a 28.57% para los mismos periodos. Aunque se contempla un porcentaje de alrededor del 33.35% para 2020, este tuvo una disminución, ya que en 2010 su valor fue de 47.81%, es decir, se acortó en 14.46 puntos porcentuales para 2020.

Una tercera dimensión de indicadores se presenta por el CONEVAL (2021), son los indicadores de ingresos en los municipios de México, 2020, enumerando los que se encuentran arriba de la línea de la pobreza y por debajo.

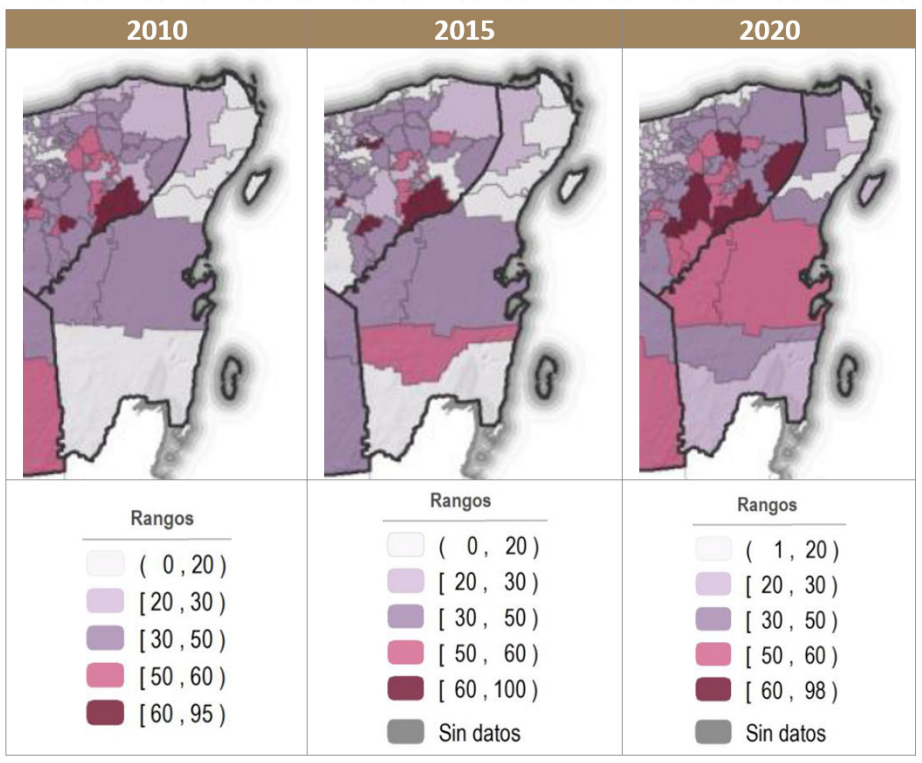
Para la medición del bienestar económico de las personas, contemplado en la metodología para la medición multidimensional de la pobreza en México (figura 28), el CONEVAL define dos líneas de pobreza: la Línea de Pobreza Extrema por Ingresos (LPEI), que equivale al valor monetario de la canasta alimentaria por persona al mes; y la Línea de Pobreza por Ingresos (LPI), que equivale al valor monetario total de la canasta alimentaria más la no alimentaria por persona al mes (CONEVAL, 2021b).

Por consiguiente, el propósito de información para medir en Líneas de Pobreza por Ingresos es contar con un referente monetario para determinar si lo que perciben las personas es mayor o menor a ciertos umbrales de ingreso establecidos de acuerdo con criterios específicos, es decir, si el ingreso corriente por persona es suficiente para adquirir los productos de la canasta básica.

Bajo esta perspectiva, se exponen los resultados proporcionados por el CONEVAL (2021) de la LPEI (figura 42 y tabla 40) y la LPI (figura 43 y tabla 40) que corresponden al municipio de Tulum, también clasificados en tres periodos de tiempo.

En la figura 42 se sitúa al municipio en 2010 y 2015 en el rango de 0 a 20% de población viviendo en la Línea de la Pobreza Extrema por Ingresos (LPEI). Para 2020 el rango aumenta a la siguiente clase quedando entre el 30% y 50% de población en este contexto.

Figura 42. Población con ingreso inferior a la Línea de Pobreza Extrema por Ingresos (LPEI), Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

En ese sentido, las cifras exactas del número de personas viviendo con ingreso inferior a la LPEI para Tulum se localizan en la tabla 40, donde se distingue que en 2010 era un 15.70% de la población (4,405 personas); en 2015 equivalente al 9.04% (3,470 personas); y en 2020 fue de un 36.54% de la población censada para ese año.

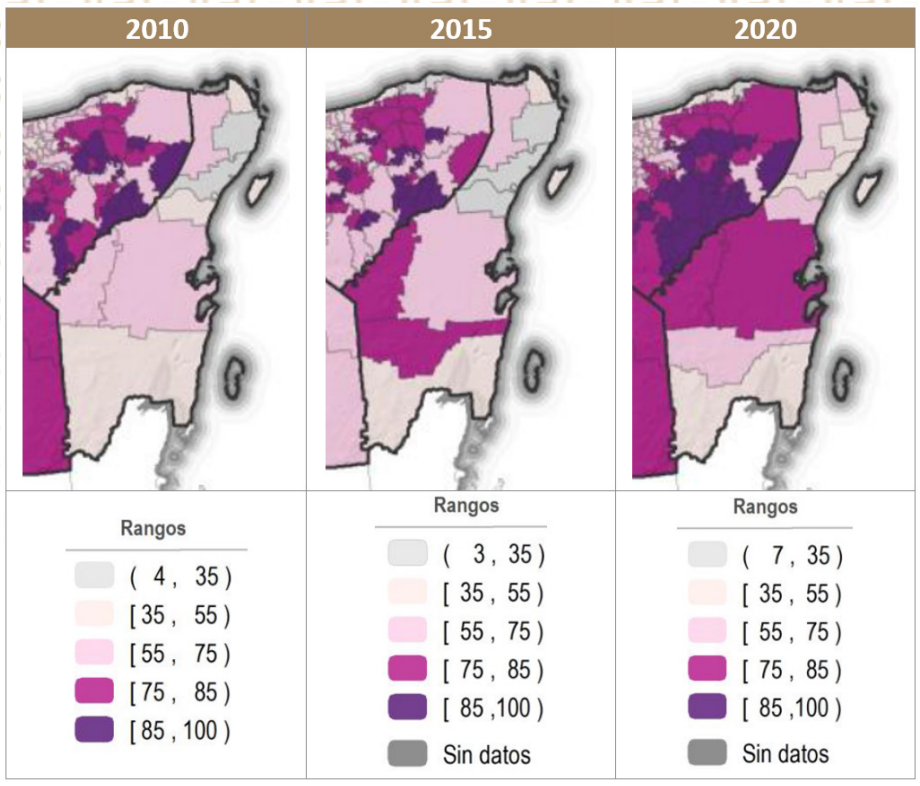
Tabla 41. Población con ingreso inferior a la Línea de Pobreza Extrema por Ingresos (LPEI) municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
15.70	9.04	36.54	4,405	3,470	16,872	2.87	2.66	2.71

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

En la figura 43 observamos que la población viviendo con un ingreso inferior a la LPI en el municipio de Tulum se situaba entre el 35% al 55% de personas en 2010; entre el 3% y 35% en 2015 y entre el 55% y 75% en 2020.

Figura 43. Población con ingreso inferior a la Línea de Pobreza por Ingresos (LPI), Municipio de Tulum.



Fuente: CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010 y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI. Encuesta Intercensal 2015, INEGI.

En cuanto a cifras exactas tenemos que en 2010 eran 13,295 personas (47.40%); en 2015 existieron 12,734 (33.17%) y para 2020 fueron 29,442 (63.75%), es decir, más de la mitad de la población vivían con un ingreso inferior a la LPI (tabla 42).

Tabla 42. Población con ingreso inferior a la Línea de Pobreza por Ingresos (LPI) municipio de Tulum

Porcentaje			Personas			Carencias (promedio)		
2010	2015	2020	2010	2015	2020	2010	2015	2020
47.40	33.17	63.75	13,295	12,734	29,442	2.51	2.41	2.53

Fuente: CONEVAL (2021a). Estimaciones del CONEVAL con base en el MCS-ENIGH 2010, la muestra del Censo de Población y Vivienda 2010, el Modelo Estadístico 2015 para la continuidad del MCS-ENIGH, la Encuesta Intercensal 2015, el Modelo Estadístico 2020 para la continuidad del MCS-ENIGH y la muestra del Censo de Población y Vivienda 2020.

Entre 2015 y 2020, los mayores aumentos en el porcentaje de población en situación de pobreza (mayor o igual a 5 puntos porcentuales) se observaron en 339 municipios a nivel nacional, entre los que destaca Tulum en Quintana Roo (CONEVAL, 2021).

Los resultados expuestos a partir del análisis del CONEVAL de la medición de la pobreza (CONEVAL, 2021) permite que los tres niveles de gobierno puedan visualizar las distintas carencias sociales y la situación de pobreza y pobreza extrema de la población, con lo cual es posible generar y priorizar intervenciones de política social, acorde al contexto heterogéneo de cada municipio del país.

Para la Gestión Integral de Riesgos de Desastres (GIRD), estos resultados son de gran importancia, ya que la población en situación de pobreza y pobreza extrema tiene muchas menos oportunidades para recuperarse de las consecuencias de los desastres y tampoco encuentran opciones para prepararse frente a ellos. Frecuentemente, existen grandes concentraciones de personas que viven en la pobreza, las cuales tienden a asentarse en áreas marginales, por lo que se hace necesario identificarlas para poder actuar en consecuencia.

4.3.2.6. Hacinamiento

El hacinamiento puede definirse como “la proporción de ocupantes con más de tres personas por dormitorio” o “el promedio de ocupantes por cuarto utilizado como dormitorio” (Centro de Información Geográfica-UQROO, 2009).

Es de suma importancia que el espacio para el desarrollo de las actividades de los ocupantes de una vivienda sea suficiente, lo anterior, propicia la disminución de los riesgos de contraer enfermedades por contagio y de daño físico por la proximidad de artefactos y de las instalaciones que los proveen de energía, que pudieran estar deteriorados o defectuosos. Asimismo, contribuye a atenuar las consecuencias negativas asociadas a la falta de privacidad, lo cual, en muchos casos da lugar a patrones de conducta no deseados en la sociedad.

Para el CONEVAL (2021) se considera en “situación de carencia de hacinamiento a las personas que residen en viviendas cuya razón de personas por cuarto es mayor que 2.5”. Con base en lo anterior se realizó el análisis respectivo, específicamente para la ciudad de Tulum, capital del municipio.

Tabla 43. Población en viviendas con carencia por hacinamiento para la ciudad de Tulum

AGEB	Población Total	Viviendas habitadas	Promedio de ocupantes por cuarto	Viviendas particulares habitadas con # cuartos:		
				1	2	3 y MÁS
0350	31	11	2.9	9	0	0
0473	2,565	788	2.6	635	76	23
0469	2,244	668	2.4	460	107	32
0454	16	5	2.3	3	0	0
0488	2,777	847	2.3	579	159	84
0100	167	43	2.2	26	4	4
0401	593	186	2.1	105	29	21
0295	3,493	1,086	2.0	723	183	162
0083	1,293	394	1.9	244	44	61
0030	1,731	538	1.8	302	90	111
0079	1,972	617	1.8	369	89	138
0308	1,766	577	1.8	389	69	103
005A	2,447	747	1.7	329	132	249
0346	133	47	1.7	32	6	6
0312	1,965	594	1.7	290	137	147
0327	424	119	1.7	20	23	43
0064	3,006	899	1.7	500	163	217
0331	904	251	1.7	80	41	80
0026	1,329	428	1.6	218	83	96
0011	729	251	1.5	51	111	67
0280	791	278	1.5	165	22	67
037A	728	237	1.2	12	87	129
0276	420	158	1.0	34	23	66
0399	67	29	1.0	0	9	15
0045	1,056	424	0.9	21	113	266
0384	335	128	0.7	0	0	124
0420	13	4	0.5	0	0	4
0098	4	3	0.4	0	0	3
0416	5	3	0.4	0	0	3
29	**28,856**	**8,845**	**2.0**	**5,313**	**1,435**	**1,577**

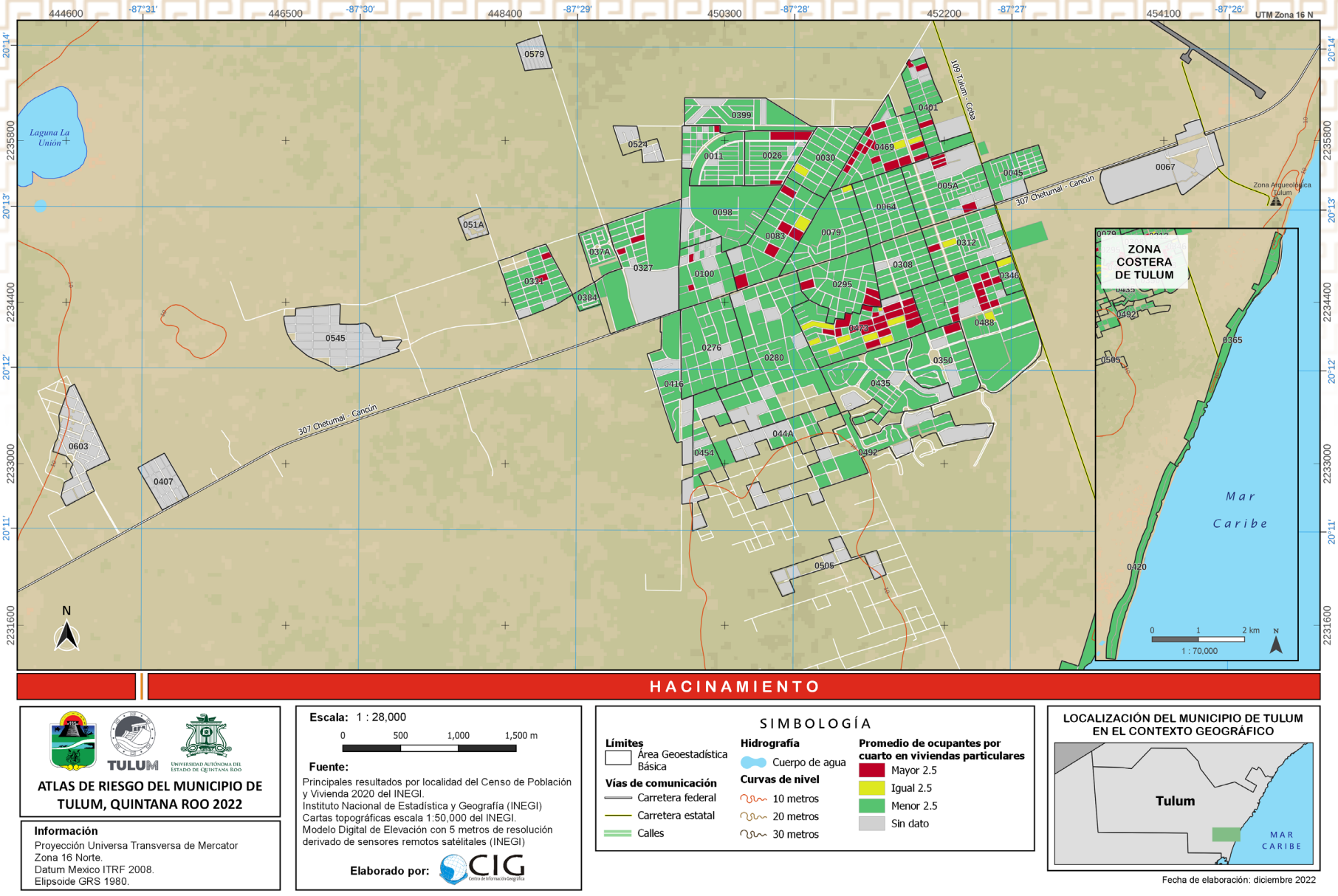
Fuente: INEGI (2021). Principales resultados por AGEB y manzana urbana 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. 2021. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México.

Como ya se mencionó en apartados anteriores, las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) que conforman la ciudad de Tulum son un total de 41, de las cuales solo 29 cuentan con información para el análisis de hogares que viven en condiciones de hacinamiento (tabla 43).

En otras palabras, se identificaron 29 AGEBs y 542 manzanas urbanas conteniendo viviendas que no tiene capacidad para albergar a todos sus miembros (tabla 43 y figura 32). En la tabla 43, se observa dos AGEBs donde las personas por cuarto son mayores a 2.5 (AGEBs 0350 y 0473) y un AGEB cercano a este criterio con 2.4 (AGEB 0469). En los dos primeros el total de población fue de 2,596 personas habitando en 799 viviendas. En el segundo el número de personas fue de 2,244 y 668 viviendas en total. Para estos tres AGEBs se advierte que existen 1,104 viviendas con un solo cuarto (tabla 43).

Ahora bien, en el análisis a nivel manzana, como ya se expuso se realizó sobre 542 manzanas, de las cuales 71 manzanas superan el criterio de 2.5, es decir, el 13.1% de las personas en esos hogares viven en situación de hacinamiento mayor al criterio establecido, es decir, más de 3 personas duermen en un solo cuarto; lo anterior se pueden observar en la figura 32 en color rojo, concentrándose al centro de la ciudad de Tulum y más dispersas al norte. De estas 542, solo 18 obtuvieron el valor de 2.5 (3.3%) también viven en hacinamiento en el límite del valor del indicador y se identifican en color amarillo, por lo que también deben ser tomadas en cuenta para esta carencia. Finalmente, 453 manzanas no viven en hacinamiento, ya que el promedio de ocupante por cuarto es menor a 2.5, siendo la parte más significativas de las manzanas urbanas, identificables en color verde (figura 44). Las manzanas que se encuentran en color gris no se tiene el dato para realizar el cálculo o se encuentran sin población.

Figura 44. Hacinamiento por manzana



Fuente: Elaboración propia con base a los Principales Resultados por Localidad. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.

4.3.2.7. Marginación

El Consejo Nacional de Población (CONAPO), señala en su página electrónica (https://www.conapo.gob.mx) que los índices de marginación se exponen por entidad federativa, municipio, localidad urbana, con base en los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020. Para el caso del municipio de Tulum, se presenta en este Atlas de Riesgo, solo los datos para el municipio y para la localidad urbana cabecera municipal, ya que sus otras localidades aun no son consideradas urbanas.

El Índice Marginación (IM), de acuerdo con la CONAPO (2021) se emplea para identificar las zonas y regiones con más carencias, y la población asentada en ellas. Define al IM como:

"El índice de marginación es una medida-resumen que permite diferenciar los estados y municipios del país según el impacto global de las carencias que padece la población como resultado de la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios insuficientes y las relacionadas con la residencia en localidades pequeñas"(CONAPO, 2021).

La construcción del IM toma como base la información censal generada en el país por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), enfocándose en los temas de educación, vivienda, distribución territorial e ingresos de la población. Se ha estimado para 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015, así como para 2020, a pesar de la pandemia de la COVID-19.

Este índice se compone de 9 indicadores que representan nueve formas de exclusión de la marginación en las dimensiones: educación, vivienda, distribución de la población e ingresos monetarios.

Educación:

- Porcentaje de población analfabeta de 15 años o más
- Porcentaje de población 15 años o más sin educación básica

Vivienda:

- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni sanitario
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin energía eléctrica
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares sin agua entubada
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con piso de tierra
- Porcentaje de ocupantes en viviendas particulares con hacinamiento

Distribución de la población:

- Porcentaje de población en localidades con menos de cinco mil habitantes

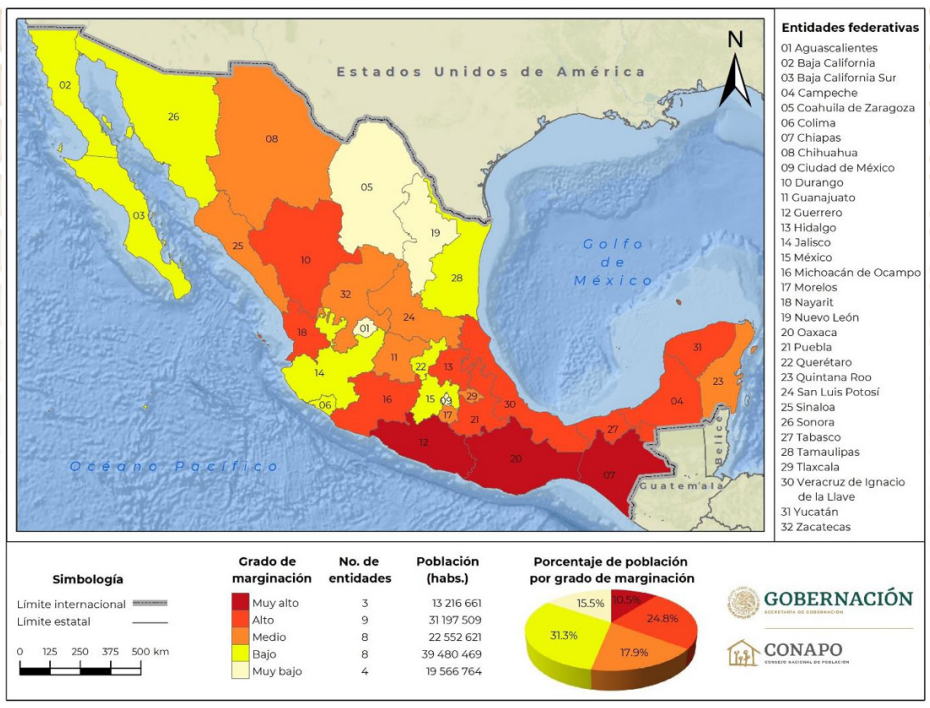
Ingresos:

- Porcentaje de población ocupada con ingresos de hasta dos salarios mínimos

Para este índice es importante tomar en cuenta los valores extremos. Cada indicador simple toma valores de 0 a 100%, los cuales se normalizan para no causar ruido en los casos extremos. Con la normalización del índice se puede analizar de forma sencilla la posición que cada estado o municipio ocupa de acuerdo con su grado de marginación estimada, su distancia respecto a otras unidades del mismo nivel de desagregación geográfica o hacia lo valores ideales o más críticos, así como su evolución y comportamiento en el tiempo (CONAPO, 2021).

De acuerdo con los principales resultados por entidad federativa, Quintana Roo cuenta con un grado de marginación medio (figura 33), siendo Guerrero, Chiapas y Oaxaca los estados con mayor marginación, en contraparte se ubican los estados de Nuevo León, Ciudad de México, Coahuila y Aguascalientes con un IM muy bajo (figura 45).

Figura 45. Grado de marginación por entidad federativa, México 2020.

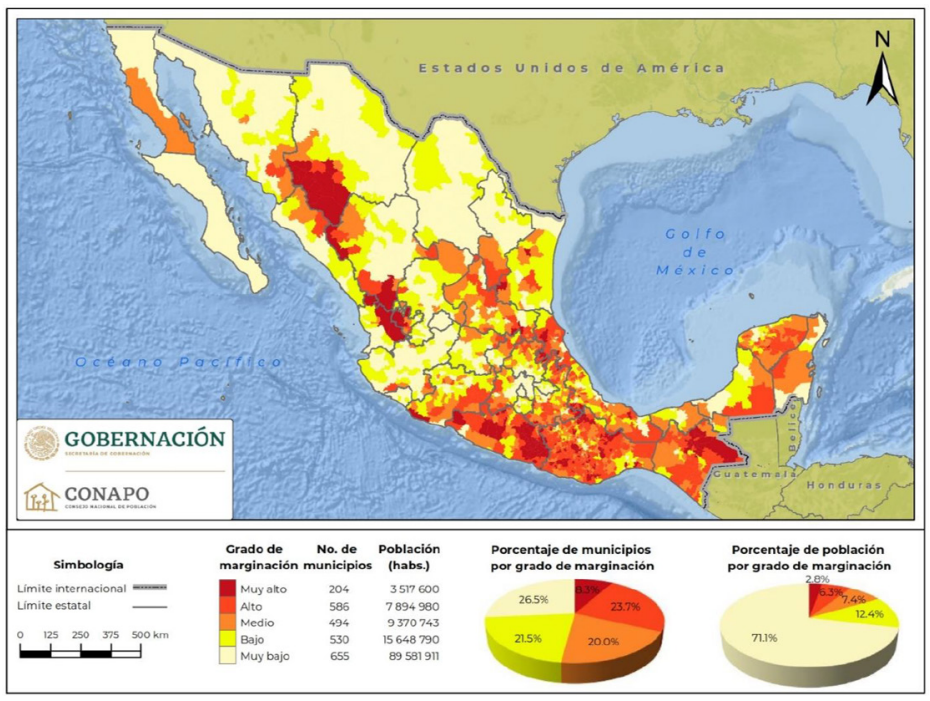


Fuente: Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

Por otro lado, en el ámbito municipal (ver figura 46), la estimación del IM muestra que prácticamente 1 de cada 3 municipios presenta alta y muy alta marginación, en donde se asientan más de 11.4 millones de personas, esto representa 9.1 por ciento de la población nacional (CONAPO, 2021).

En contraste, los resultados señalan que 48% de los municipios tienen muy bajo y bajo grado de marginación, donde reside poco más de 83% de la población del país, es decir, 105.2 millones de personas (CONAPO, 2021).

Figura 46. Grado de marginación por municipio, México 2020.



Fuente: Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

Tabla 45. Población total e indicadores socioeconómicos de las localidades del municipio de Tulum 2020

Localidad	Población total	Porcentaje de la población (%)							
		ANALF	SBASC	OVSDE	OVSEE	OVSAE	OVPT	OVHAC	OVSREF
San Pedro	136	11.39	63.29	60.29	5.15	0.00	35.29	87.50	55.15
Chanchén Palmar	597	20.83	44.79	32.50	18.43	9.88	27.14	87.10	70.85
Árboles Tulum	20	43.75	68.75	0.00	0.00	0.00	0.00	75.00	70.00
Hondzonot	391	21.91	49.82	22.76	7.93	5.12	22.51	77.24	45.27
India Blanca	26	7.69	38.46	3.85	61.54	0.00	0.00	61.54	84.62
Yaxché	367	25.48	53.67	13.97	1.37	4.66	28.49	82.42	33.15
Sahcab Mucuy	596	12.80	59.73	11.09	3.35	0.00	9.33	80.81	63.56
India Blanca	19	7.14	35.71	0.00	36.84	0.00	0.00	100.00	57.89
Chanchén Primero	1,078	18.74	44.48	29.57	3.54	1.77	9.24	78.36	35.63
San Juan	770	14.29	39.68	25.06	2.47	2.73	13.90	66.62	44.29
Macario Gómez	884	7.96	46.47	2.31	16.40	15.19	4.25	58.57	36.70
Dos Palmas	32	9.09	31.82	0.00	0.00	0.00	18.75	40.63	75.00
Manuel Antonio Ay	621	8.61	46.65	3.52	2.85	1.34	8.39	55.20	28.69
Francisco Uh May	1,288	7.83	41.37	2.71	2.87	1.48	5.25	67.27	26.00
La Unión	62	0.00	33.33	0.00	16.13	0.00	0.00	93.55	16.13
Cobá	1,738	8.89	37.43	6.39	1.50	1.61	8.75	58.17	24.80
La Ceiba	45	3.23	19.35	0.00	11.11	0.00	13.33	68.89	35.56
Kilómetro Doce	40	9.68	32.26	0.00	0.00	0.00	0.00	82.50	20.00
Paraíso [Rancho]	9	0.00	33.33	0.00	0.00	0.00	0.00	77.78	33.33
Jacinto Pat	100	5.48	32.88	0.00	1.03	0.00	21.65	45.36	35.05
Tres Hermanos	18	0.00	35.71	0.00	0.00	0.00	0.00	88.89	0.00

En este contexto, el municipio de Tulum obtuvo un Grado de Marginación bajo (56.15%) (figura 46) situándose dentro del 48% de los municipios del país con un grado bajo y muy bajo de este índice (CONAPO, s.f.).

Ahora bien, de los 2,468 municipios que conforman a la República Mexicana, Tulum ocupo el lugar número 1,700 en el contexto nacional de acuerdo con el Grado e Índice de Marginación alcanzado (CONAPO, s.f.). En la siguiente tabla se muestran los indicadores socioeconómicos, la población total, índice y grado de marginación del municipio de Tulum.

Tabla 44. Población total, indicadores socioeconómicos, índice y grado de marginación del municipio de Tulum 2020

Población total	46 721
% Población de 15 años o más analfabeta	4.74
% Población de 15 años o más sin educación básica	29.67
% Ocupantes en viviendas particulares sin drenaje ni excusado	3.64
% Ocupantes en viviendas particulares sin energía eléctrica	2.46
% Ocupantes en viviendas particulares sin agua entubada	2.85
% Ocupantes en viviendas particulares con piso de tierra	7.43
% Viviendas particulares con hacinamiento	43.24
% Población en localidades con menos de 5,000 habitantes	28.57
% Población ocupada con ingresos menores a 2 salarios mínimos	51.26
Índice de Marginación, 2020	56.15
Grado de Marginación, 2020	Bajo
Índice de Marginación normalizado, 2020	0.88
Lugar que ocupa en el contexto nacional	1 700

Fuente: Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

El grado de marginación para el municipio de Tulum en 2020 fue bajo, el índice fue de 56.15% que ya normalizado es de 0.88. Esto es, que se encuentra más cercano al límite extremo máximo que para los municipios fue de 63.86% (CONAPO, 2021), con la normalización se analiza de forma más sencilla su posición, donde se observa cercano al 1.

Por otro lado, el Índice de Marginación por localidad 2020, se desarrolló con indicadores socioeconómicos del Censo de Población y Vivienda 2020, se estimaron 8 indicadores que representan las formas de exclusión de la marginación en las dimensiones: educación, vivienda y disponibilidad de bienes (CONAPO, 2021a).

A continuación, en la tabla 45 se muestra el cálculo de éstos ocho indicadores para 47 localidades, incluida la ciudad de Tulum, cabecera municipal y la única identificada como localidad urbana; y en la tabla 48 se expone el Índice de Marginación (IM), el Grado de Marginación (GM) y el Índice de Marginación Normalizado (IMN). Cabe señalar que la estimación del índice de marginación por localidad censal solo incluye localidades con tres o más viviendas.

Localidad	Población total	Porcentaje de la población (%)							
		ANALF	SBASC	OVSDE	OVSEE	OVSAE	OVPT	OVHAC	OVSREF
Tulum	33,374	2.91	26.00	1.39	0.74	2.83	7.00	57.32	21.70
Las Dos Hermanas	18	0.00	7.69	0.00	0.00	0.00	0.00	77.78	33.33
Don Brígido	33	4.00	28.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69.70	12.12
Punta Sur	16	0.00	60.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	0.00
Akumal	2,154	4.81	33.31	0.79	0.05	0.51	2.93	52.16	11.19
Alfa y Mega	16	0.00	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.25	0.00
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	4.90	39.54	0.00	5.15	0.27	2.71	30.35	10.84
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	0.00	27.27	0.00	0.00	0.00	0.00	60.00	6.67
Bahías de Punta Solimán	56	4.55	25.00	0.00	7.14	0.00	0.00	37.50	14.29
Tankah Tres	62	0.00	35.29	0.00	0.00	0.00	0.00	43.55	0.00
Akumal Sur	15	0.00	15.38	0.00	0.00	0.00	0.00	60.00	0.00
Ciudad Chemuyil	548	1.41	24.41	0.00	0.00	0.00	0.00	38.50	3.28
Océano Azul	12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.33	33.33
Cenote Calavera	7	0.00	28.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.57
Lum Ha [Lotes]	9	0.00	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00	33.33	11.11
Cachito de Cielo	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	55.56	0.00
El Pequeño Paraíso	34	0.00	29.63	0.00	0.00	0.00	5.88	8.82	8.82
Balam Luum	11	0.00	16.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.18
Gran Bahía Príncipe	29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.69	0.00
Aventuras Akumal	15	0.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Balam Canché	5	0.00	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Chan Chemuyil	127	0.00	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	5.74	0.00
Kirabo	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Yolis	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cafeto Cimarrón	15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Yax'muul [Rancho]	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: POB_TOT: Población total; ANALF: % de población de 15 años o más analfabeta; SBASC: % de población de 15 años o más sin educación básica; OVSDE: % de ocupantes en viviendas particulares habitadas sin drenaje ni excusado; OVSEE: % de ocupantes en viviendas particulares habitadas sin energía eléctrica; OVSAE: % de ocupantes en viviendas particulares habitadas sin agua entubada; OVPT: % de ocupantes en viviendas particulares habitadas con piso de tierra; OVHAC: % de ocupantes en viviendas particulares habitadas con hacinamiento; OVSREF: % de ocupantes en viviendas particulares habitadas sin refrigerador.

Fuente: CONAPO (2021a). Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

A partir del procesamiento de datos de estos indicadores se estimó el Índice de Marginación (IM), el Índice de Marginación Normalizado (IMN) y el Grado de Marginación (GM) por localidad, el cual se expone en la tabla 46.

Tabla 46. Índice y grado de marginación de las localidades del municipio de Tulum 2020

Nombre Localidad	IM	GM	IMN
San Pedro	16.15	Alto	0.62
Chanchén Palmar	16.26	Alto	0.62
Árboles Tulum	17.44	Alto	0.67
Hondzonot	18.04	Alto	0.69
India Blanca	18.18	Alto	0.69
Yaxché	18.30	Alto	0.70
Sahcab Mucuy	18.59	Alto	0.71
India Blanca	18.83	Medio	0.72
Chanchén Primero	18.99	Medio	0.73
San Juan	19.49	Medio	0.74
Macario Gómez	20.37	Medio	0.78
Dos Palmas	20.71	Medio	0.79
Manuel Antonio Ay	21.30	Bajo	0.81
Francisco Uh May	21.33	Bajo	0.81
La Unión	21.36	Bajo	0.82
Cobá	21.52	Bajo	0.82
La Ceiba	21.55	Bajo	0.82
Kilómetro Doce	21.60	Bajo	0.83
Paraíso [Rancho]	21.80	Bajo	0.83
Jacinto Pat	21.83	Bajo	0.83
Tres Hermanos	22.41	Bajo	0.86
Tulum	22.51	Bajo	0.86
Las Dos Hermanas	22.58	Bajo	0.86
Don Brígido	22.65	Bajo	0.87
Punta Sur	22.85	Bajo	0.87
Akumal	22.88	Bajo	0.87
Alfa y Mega	22.96	Bajo	0.88
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	23.24	Muy bajo	0.89
Kilómetro Diez Punto Cinco	23.34	Muy bajo	0.89
Bahías de Punta Solimán	23.40	Muy bajo	0.89
Tankah Tres	23.79	Muy bajo	0.91
Akumal Sur	23.90	Muy bajo	0.91
Ciudad Chemuyil	24.10	Muy bajo	0.92
Océano Azul	24.16	Muy bajo	0.92
Cenote Calavera	24.44	Muy bajo	0.93
Lum Ha [Lotes]	24.46	Muy bajo	0.93
Cachito de Cielo	24.50	Muy bajo	0.94
El Pequeño Paraíso	24.58	Muy bajo	0.94
Balam Luum	25.12	Muy bajo	0.96
Gran Bahía Príncipe	25.56	Muy bajo	0.98
Aventuras Akumal	25.57	Muy bajo	0.98
Balam Canché	25.57	Muy bajo	0.98
Chan Chemuyil	25.93	Muy bajo	0.99
Kirabo	26.18	Muy bajo	1.00
Yolis	26.18	Muy bajo	1.00
Cafeto Cimarrón	26.18	Muy bajo	1.00
Yax'muul [Rancho]	26.18	Muy bajo	1.00

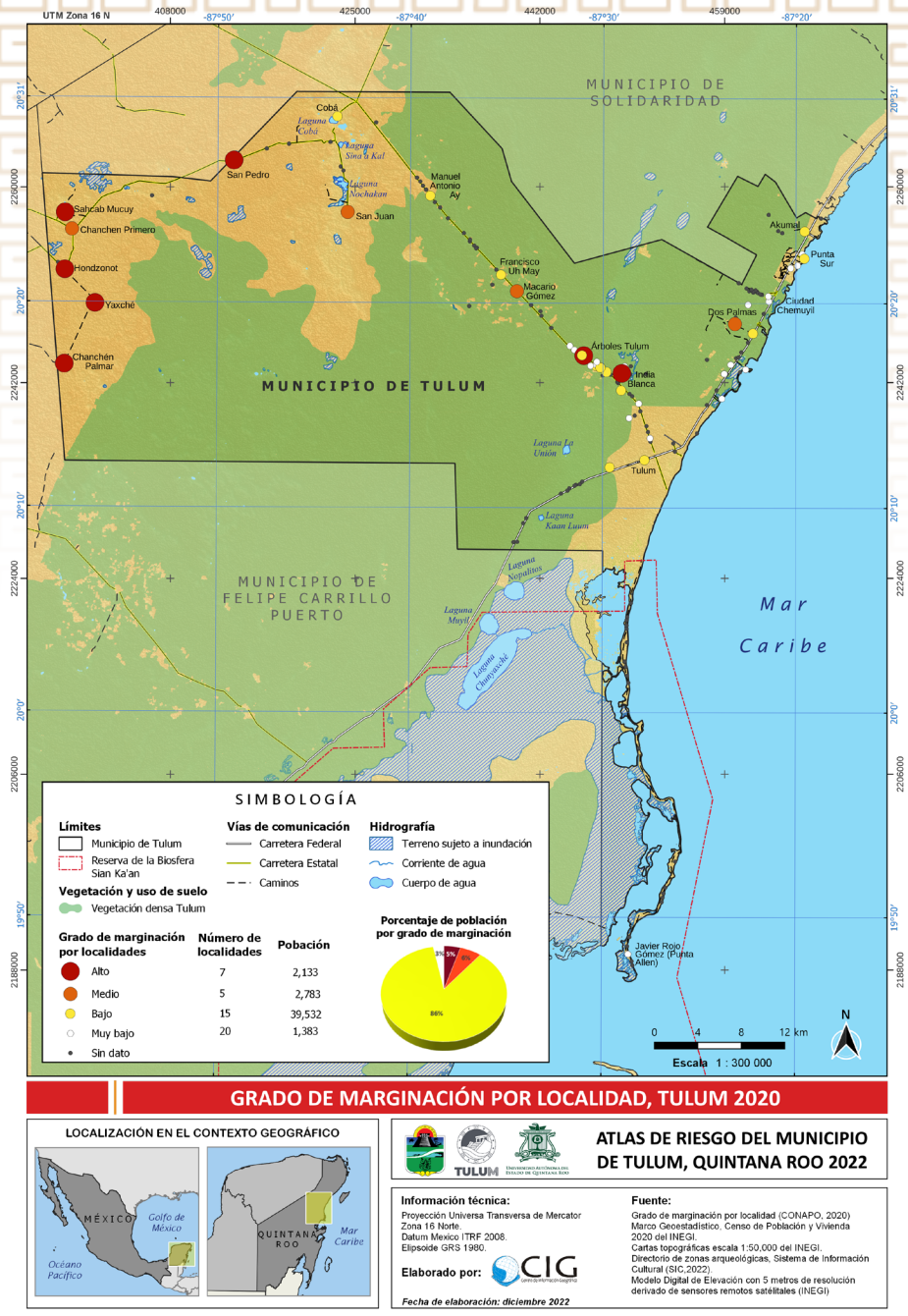
Fuente: CONAPO (2021a). Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

Como se puede observar en la tabla 46, de las 47 localidades analizadas son 7 localidades que se ubican en "Alto" grado de marginación, es decir, casi el 15% del total. Le siguen cinco localidades con un grado "Medio", quince con un grado "Bajo", en las que se encuentra la ciudad de Tulum con el 22.51%, y las restantes veinte con un grado de marginación "Muy bajo", entre las localidades identificadas en este rango se encuentran Punta Allen, Akumal Sur, entre otros (figura 35).

De acuerdo con el escenario mínimo y máximo para el IM para localidades 2020, los extremos estuvieron en 0 y 26.18% (CONAPO, 2021a), por lo que las localidades con el máximo valor alcanzado con el índice normalizado alcanzan el 1, menor marginación, y con valores cercanos a 0, se interpreta como mayor marginación.

Con base a lo anterior, son siete localidades con una población aproximada de 2,133 que cuentan con un GM "Alto", como ya se mencionó, lo que significa un 5% de la población total del municipio. Son cinco con grado "Medio" (2,783 personas) que equivale al 6%, quince localidades con grado "Bajo" (39,532 personas) y un porcentaje del 86%, es decir donde se concentra la mayor parte de la población, y finalmente, son veinte localidades con "Muy bajo" grado (1,383 personas) (figura 47).

Figura 47. Índice de marginación por localidad de Tulum 2020.



Fuente: CONAPO (2021a). Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

Por otro lado, un siguiente análisis a nivel urbano (nivel AGEB) para la ciudad de Tulum se realizó utilizando datos del CONAPO (2021b) y los microdatos del Censo de Población y Vivienda 2020.

De lo anterior, se estimaron los indicadores que representan 11 formas de exclusión de la marginación en las dimensiones: educación, salud, vivienda y disponibilidad de bienes a nivel urbano. En la tabla 47 se muestra por AGEB los valores alcanzados para el IM, GM y el INM.

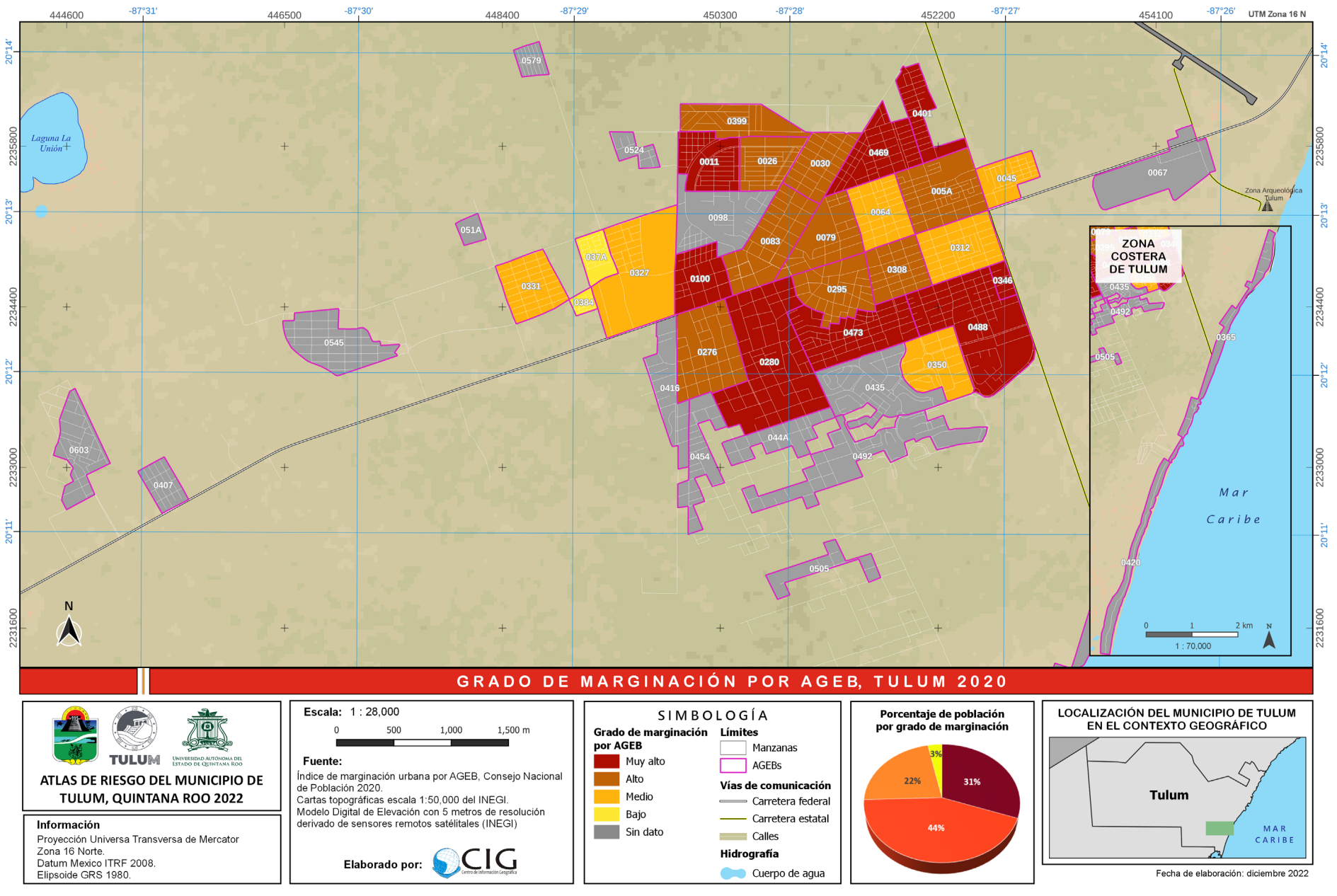
Tabla 47. Índice de marginación urbana por AGEB, ciudad de Tulum 2020

CVE_AGEB	Población Total	IM	GM	IMN
2300900010473	2,587	105.9	Muy alto	0.83
2300900010346	134	106.7	Muy alto	0.83
2300900010401	623	107.2	Muy alto	0.84
2300900010488	2,789	107.8	Muy alto	0.84
2300900010100	221	109.2	Muy alto	0.85
2300900010469	2,249	109.7	Muy alto	0.86
2300900010011	751	114.8	Muy alto	0.90
2300900010280	811	115.2	Muy alto	0.90
2300900010276	437	116.4	Alto	0.91
230090001005A	2,476	116.8	Alto	0.91
2300900010295	3,498	117.7	Alto	0.92
2300900010083	1,298	117.8	Alto	0.92
2300900010026	1,347	117.8	Alto	0.92
2300900010030	1,731	117.9	Alto	0.92
2300900010399	79	118.0	Alto	0.92
2300900010079	1,972	118.1	Alto	0.92
2300900010308	1,778	118.5	Alto	0.93
2300900010312	1,983	118.7	Medio	0.93
2300900010327	427	118.8	Medio	0.93
2300900010331	913	118.9	Medio	0.93
2300900010064	3,006	119.0	Medio	0.93
2300900010045	1,062	120.9	Medio	0.94
2300900010350	51	121.0	Medio	0.95
230090001037A	728	121.4	Bajo	0.95
2300900010384	335	123.3	Bajo	0.96

Nota: CVE_AGEB: Clave de Área Geoestadística Básica. IM: Índice de Marginación. GM: Grado de Marginación. IMN: Índice Normalizado de Marginación.
Fuente: CONAPO. (2021b). Índice de marginación urbana 2020. Nota técnico-metodológica. Septiembre 2021.

Bajo esta unidad de análisis se expone en la figura 36 la distribución de los valores alcanzados por AGEB para el IM y el GM de la localidad urbana de Tulum. Este nivel de análisis permite diferenciar las AGEB urbanas según las carencias que padece la población como resultado de la falta de acceso a la educación y la salud, la residencia en viviendas inadecuadas, y la carencia de bienes sobre estas unidades territoriales (CONAPO, 2021b).

Figura 48. Índice de marginación urbana (AGEB), ciudad de Tulum 2020.



Fuente: CONAPO (2022). Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

CONAPO (2021b) contabilizó 25 unidades para este análisis a nivel urbano, sin embargo, como ya se ha mencionado en este documento, se adecuaron otras unidades que conforman la traza urbana de toda la ciudad de Tulum, con esta actualización para fines de este Atlas se manejan 41 AGEB. No obstante, hay que señalar que no se tiene la información para estos nuevos 16 AGEB a este nivel de desagregación, pero a nivel colonia urbana la mayoría ha sido cubierto.

Continuando con el análisis a nivel urbano, el 44% de los AGEBs obtuvieron un nivel "Alto" de marginación observándose en la figura 48 de color naranja fuerte hacia el centro de la ciudad. Un 31% de AGEBs tiene un grado "Muy Alto", los cuales se observan más alejados del centro de la ciudad, su distribución se observa posterior a la zona centro. El nivel "Medio" se localiza disperso en toda el área urbana y solo dos AGEB expresan un grado "Bajo", los cuales se pueden observar al noroeste de la ciudad en color amarillo (figura 36)

Por otro lado, el índice de marginación, como una de las principales herramientas analíticas y operativas para la dirección de acciones de políticas y estrategias sociales logra expresar desigualdades territoriales. Bajo este contexto se anexa el análisis del Índice de Marginación Urbana por Colonia 2020 para la ciudad de Tulum a través de la tabla 48 y la figura 49 (CONAPO, 2022).

Para la obtención del IM a nivel de colonia se emplean once indicadores socioeconómicos, a diferencia de los 8 que se utilizan a nivel localidad o municipio:

- Porcentaje de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
- Porcentaje de población de 15 años o más sin educación básica
- Porcentaje de población sin derechohabiencia a los servicios de salud
- Porcentaje de ocupantes en viviendas sin drenaje ni excusado
- Porcentaje de ocupantes en viviendas sin energía eléctrica
- Porcentaje de ocupantes en viviendas sin agua entubada
- Porcentaje de ocupantes en viviendas con piso de tierra
- Porcentaje de ocupantes en viviendas con hacinamiento
- Porcentaje de ocupantes en viviendas sin refrigerador
- Porcentaje de ocupantes en viviendas sin internet
- Porcentaje de ocupantes en viviendas sin celular

Cabe señalar, que la expansión urbana de la ciudad de Tulum abarca localidades rurales que se encuentran ya dentro de la traza urbana de la ciudad, por tal motivo se anexan como colonias, aunque su IM, GM y si IMN fue calculado metodológicamente como una localidad, las cuales se enlistan al final de la tabla 48. Por lo que el total de colonias urbanas son 28, de las cuales solo una no cuenta con datos (Aldea Tulum).

Tabla 48. Índice y grado de marginación urbana por colonia, ciudad de Tulum 2020

Nombre de la colonia	Clasificación	Población total	IM	GM	IMN
Kukulcán	Colonia	253	132.51	Muy alto	0.84
Yax Balam	Colonia	722	133.61	Muy alto	0.85
Tulum	Colonia	1,546	134.70	Muy alto	0.86
Sin Nombre 1	Colonia	1,493	134.93	Muy alto	0.86
Emiliano Zapata	Colonia	533	137.13	Muy alto	0.87
Carlos Joaquin	Colonia	356	137.33	Muy alto	0.88
Lopez Obrador	Colonia	430	137.92	Muy alto	0.88
Sac-Beh	Colonia	1,695	140.30	Muy alto	0.89
Aldea Zama	Residencial	86	141.71	Muy alto	0.90
Sijil Kiin	Colonia	454	142.30	Muy alto	0.91
Sin Nombre 2	Fraccionamiento	2,064	143.34	Muy alto	0.91
La Veleta	Colonia	1,128	143.42	Muy alto	0.91
Tumben - Kaa	Fraccionamiento	1,801	144.39	Alto	0.92
Ejidal	Colonia	3,217	144.53	Alto	0.92
Centro	Colonia	10,908	144.63	Alto	0.92
Riviera Tulum	Residencial	151	144.64	Alto	0.92
Guerra de Castas	Fraccionamiento	816	144.92	Alto	0.92
Jaguares	Colonia	696	146.01	Alto	0.93
Maya Pax	Colonia	1,564	146.84	Alto	0.94
Huracanes	Fraccionamiento	230	146.97	Alto	0.94
Xul-Kaah	Fraccionamiento	102	147.42	Medio	0.94
Ya Ax Tulum	Fraccionamiento	894	147.63	Medio	0.94
Villas de Tulum	Fraccionamiento	1,004	148.80	Medio	0.95
Las Palmas Tulum	Fraccionamiento	1,141	150.24	Bajo	0.96
Localidades identificadas como colonias urbanas					
La Unión	Colonia	74	17.80	Alto	0.68
Cristal	Colonia	352	18	Alto	1
Marités	Colonia	36	19	Medio	1
Aldea Tulum	Colonia	ND	ND	ND	ND

Nota: IM: Índice de Marginación; GM: Grado de Marginación; IMN: Índice de Marginación Normalizado.
Fuente: CONAPO (2022). Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

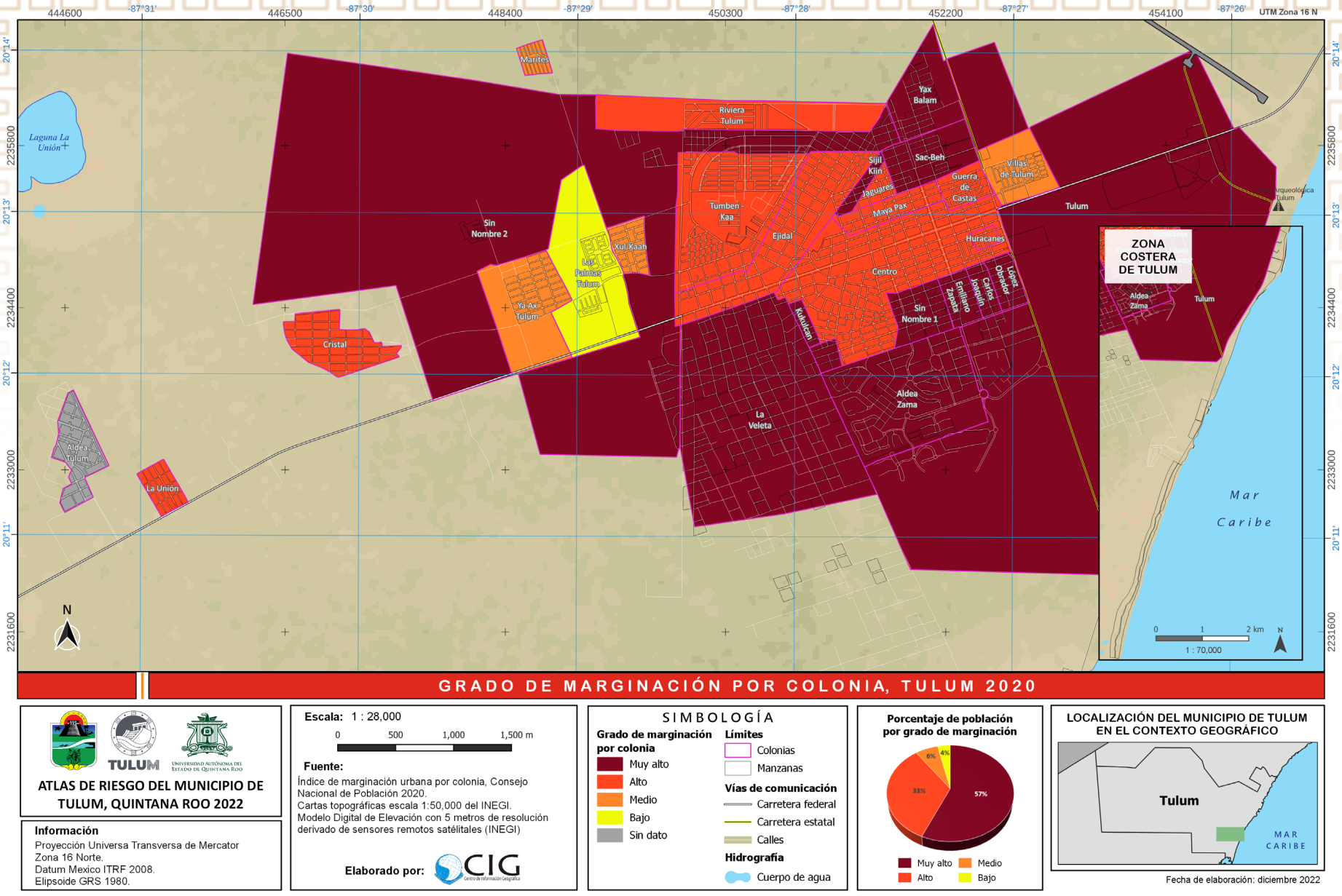
Los escenarios extremos del Índice de Marginación por Colonia, 2020 (CONAPO, 2022) indican el valor 0 como el mínimo y el valor 156.85% como máximo. Por los valores atípicos que pueden resultar del cálculo del índice este se ajusta o normaliza entre 0 y 1. Con el procedimiento anterior, se puede analizar de forma sencilla la posición que cada colonia ocupa de acuerdo con su intensidad de marginación estimada.

Partiendo de lo anterior, tenemos que de las 28 colonias identificadas por CONAPO (2022) doce obtuvieron un Grado de Marginación "Muy Alto", donde habitan alrededor de 10,760 personas; diez colonias son identificadas con grado "Alto" (19,810 personas); cuatro con grado "Medio" (2,037 personas); y solo una obtuvo un grado "Bajo" de marginación (1,141 personas) que fue el Fraccionamiento Las Palmas Tulum (tabla x).

En la figura 49 se puede observar la distribución espacial del Grado de Marginación en la ciudad de Tulum por colonia urbana para 2020. Se observa que el 57% de la población que habita en la ciudad de Tulum tiene un Grado de Marginación "Muy Alto" en contraste con solo el 4% que obtuvo un "Bajo" grado de marginación. El centro de la ciudad, donde se concentran las actividades económicas y quedan pocas viviendas muestra un grado "Alto" y Fraccionamientos más recientes un grado "Medio" (tabla 47 y figura 49).

En conclusión, la identificación de los niveles de marginación y pobreza en las que viven las comunidades incrementan su vulnerabilidad ante las amenazas, pero a su vez es un insumo para la atención y recuperación ante un desastre, que conlleva un reto para la implementación de acciones de mitigación y prevención desde lo local a lo nacional por parte de los gobiernos.

Figura 49. Grado de marginación urbana por colonia, ciudad de Tulum 2020



Fuente: CONAPO (2022). Estimaciones del CONAPO con base en el INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

4.3.3. Características de la vivienda

4.3.3.1. Tipología de vivienda

El INEGI (https://www.inegi.org.mx/temas/vivienda/) maneja, entre los temas Demográficos y Sociales, la información sobre el volumen de las viviendas del país, sus características de construcción, así como el número de sus ocupantes, incluyendo los servicios con los que cuentan las viviendas y sus bienes.

En esta sección se muestra espacialmente para la ciudad de Tulum las viviendas distribuidas en manzanas urbanas de acuerdo con su material de construcción y los servicios en la vivienda.

4.3.3.2. Material de construcción

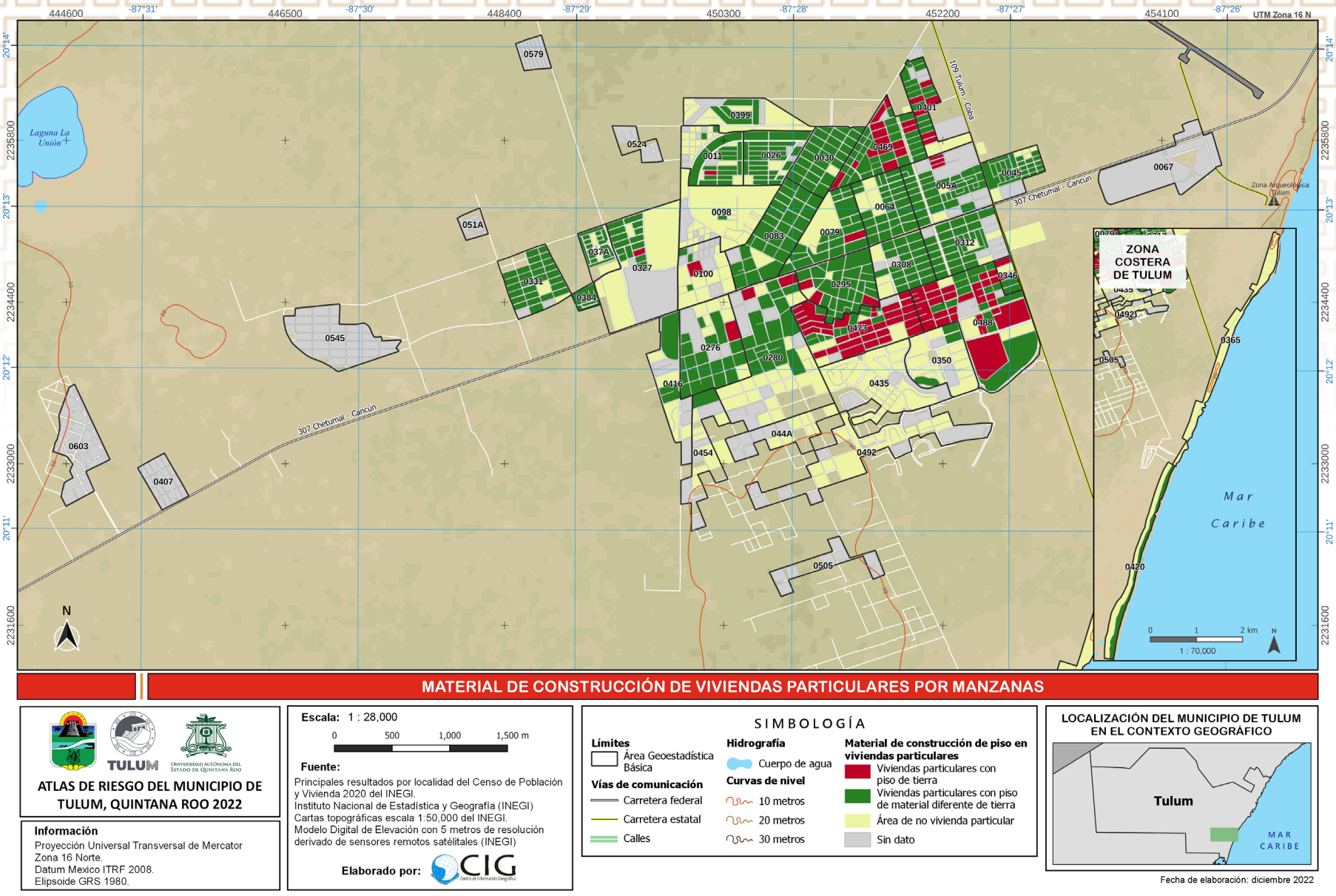
Las viviendas particulares con piso de tierra, comprende las viviendas particulares para las que se captaron las características de la vivienda, clasificadas como: casa única en el terreno; casa que comparte terreno con otra(s); casa dúplex; departamento en edificio; vivienda en vecindad o cuartería; vivienda en cuarto de azotea de un edificio y no especificado de vivienda particular. Incluye a las viviendas particulares sin información de ocupantes (INEGI, 2020a).

Tabla 49. Viviendas particulares con piso de tierra, ciudad Tulum 2020

Total de viviendas particulares	Total de viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas con piso de material diferente de tierra	Viviendas particulares habitadas con piso de tierra
12,637	10,313	9,753	560

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Figura 50. Material de construcción de viviendas particulares habitadas por manzana, ciudad de Tulum, 2020



Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Del total de viviendas particulares habitadas (10,313) el 5.43% son viviendas con piso de tierra, el resto de las manzanas que contienen viviendas, el 94. 57%, son viviendas con material de piso diferentes a tierra, las cuales constituyen la mayoría de las viviendas en la ciudad.

La distribución en la ciudad de Tulum se observa en la figura 50 donde las viviendas con piso de tierra se localizan en las áreas de asentamientos irregulares, más concentradas hacia el sur rumbo a la zona hotelera y al norte de la ciudad.

4.3.3.3. Servicios en la vivienda

En esta sección se señalan el total de viviendas particulares habitadas que tienen energía eléctrica, agua entubada dentro de la vivienda o sólo en el patio o terreno y drenaje conectado a la red pública de la ciudad de Tulum.

Como se puede constatar, en la tabla 50, el total de viviendas particulares habitadas fue de 10,313 para 2020, de las cuales 9, 754 cuentan con servicios de agua entubada, luz eléctrica y drenaje, lo que equivale a un 94.6% de cobertura de servicios en la ciudad de Tulum y existe un 5.4% de viviendas sin datos.

Tabla 50. Servicios en viviendas particulares, ciudad Tulum 2020

Total de viviendas particulares	Total de viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica, agua entubada de la red pública y drenaje	Viviendas particulares habitadas que NO disponen de energía eléctrica, agua entubada, ni drenaje
12,637	10,313	9,754	S.D.

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Ahora bien, si estos indicadores los desagregamos, tenemos que de las 10,313 viviendas el 98.9% de ellas cuentan con energía eléctrica y un mínimo porcentaje no. En el caso de agua entubada en la vivienda un 96.8% cuenta con este servicio dentro de la vivienda y un 97.3% cuenta con drenaje (tabla 51).

Tabla 51. Cobertura de los principales servicios en viviendas particulares, ciudad Tulum 2020

Total de viviendas particulares	Total de viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica	Cobertura (%)
12,637	10,313	10, 199	98.9%
		Viviendas particulares habitadas que disponen de agua entubada	**Cobertura (%)**
		9,978	96.8%
		Viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje	**Cobertura (%)**
		10,031	97.3%

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

4.3.3.4. Zonificación

La zonificación determina el potencial de desarrollo de cada predio (tabla 52). Con base en el trabajo de Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007) se actualizó la zonificación para el área urbana de la ciudad de Tulum.

No obstante, a la zonificación primaria establecida en los Programas de Desarrollo Urbano (PDU) le pueden aplicar excepciones y modificaciones de conformidad con los instrumentos de desarrollo urbano y aplicación de Normas de Ordenación del territorio en cuestión.

La zonificación definida en ese instrumento establece el tipo de aprovechamiento urbano en áreas y predios comprendidos dentro de su límite, mediante el establecimiento de usos, destinos y reservas, sin embargo, para este instrumento de planeación (Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum) y con fines de evaluar el riesgo en la ciudad de Tulum, algunas zonificaciones se conjugaron de acuerdo con su tipo principal de uso de suelo. Esta modificación se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 52. Variables de zonificación Tulum

Variable	Significado	Expresión	Fundamento
Uso de suelo	Expresa el destino o uso de suelo o actividades que se pueden realizar en dicho predio.	H: Habitacional MA: Monumentos/Sitio Arqueológicos PERS: Preservación Ecológica Ríos Subterráneos PEFF: Preservación Ecológica Flora y Fauna P: Parques C: Comercial Barrial/Central T: Turístico M: Mixto comercial/habitacional E: Equipamiento Institucional/Regional I: Industria SC: Subcentro urbano	Los usos de suelo se establecen en los Programas de Desarrollo Urbano
Niveles máximos de construcción	Establece el número máximo de niveles que se pueden construir en un inmueble.	/3 significa que solo se permiten tres niveles contando Planta Baja H: /2 y /3 MA: Nulo PERS: /1 PEFF: /1 P: /1 C: /3 T: /2 y /3 M: /3 E: /3 I:/3 SC: /3	Los niveles máximos están determinados por la zonificación que a cada predio asignan los Programas de Desarrollo Urbano
Área libre mínima	Establece el porcentaje de área libre mínima en donde NO se permite la construcción.	Son dos tipos de normas las que regulan la intensidad de aprovechamiento del suelo para el centro de urbano de la ciudad de Tulum: **COS =** (1-% de área libre (expresado en número decimal)) /superficie total del predio **CUS =** (superficie de desplante x número de niveles permitidos) /superficie total del predio	El porcentaje de área libre se establece en los Programas de Desarrollo Urbano y Parciales de Desarrollo Urbano de cada municipio, de acuerdo con la zonificación asignada a cada predio.
Densidad de vivienda	Indica el número total de viviendas que pueden construirse en un predio		La densidad del predio también está establecida en la zonificación que asigne a cada predio los Programas de Desarrollo Urbano o Parciales de Desarrollo Urbano de cada municipio.

Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

4.3.3.5. Uso de suelo

Las ciudades son espacios geográficos transformados por las personas que habitan en ellas, además de que existe intercambio de bienes y servicios. Estos espacios dan derechos a sus propietarios para su uso y aprovechamiento bajo términos establecidos en instrumentos de zonificación como los PDU.

El uso de suelo determina qué actividades están permitidas al interior de ese predio o espacio geográfico. También en los PDU se establece la disponibilidad de suelo para los próximos 20, 30 o 40 años. El objeto primario del uso del uso en una ciudad es habitacional, éste puede ser solo habitacional o habitacional mixto donde se permiten otras actividades necesarias para vivir.

Los usos de suelo pueden ser tan diversos como las actividades humanas y varían de un territorio a otro. Pero para determinar el uso de suelo deben conocerse sus características:

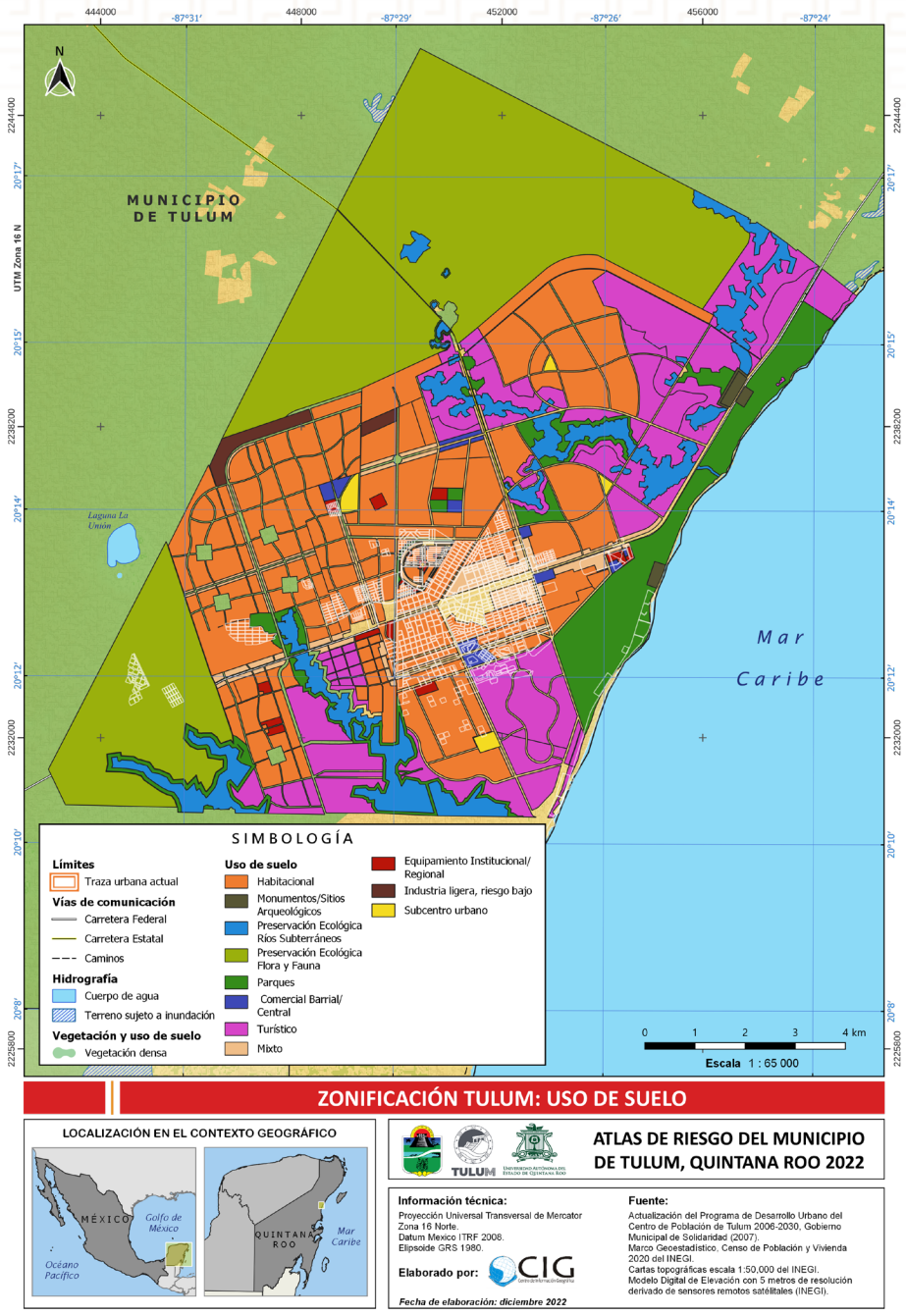
- ***Suelo apto:*** condiciones de ubicación, geología, topografía, disponibilidad de agua, costos de desarrollo y otros factores físicos que permiten que sea adecuado para uso urbano (DOF, 2014).
- ***Suelo de conservación:*** espacios donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad humana, y que por condiciones de carácter ambiental y equilibrio ecológico deben preservarse (Sedesol, 2007a, cit. INSUS, 2020).
- ***Suelo servido:*** condicionado con redes de servicios, infraestructura de transporte, equipamiento público y diversos tipos de edificaciones para que las actividades humanas puedan llevarse a cabo (Baer, 2013, cit. INSUS, 2020).
- ***Suelo vacante:*** terrenos que permanecen desocupados o que están subutilizados, se reconocen como urbanos y se localizan muy próximos a infraestructuras ya instaladas, pero que no se desarrollan, contrariando el principio de la función social del suelo (Cardona, 2015 cit. INSUS, 2020)

El rápido y desarticulado proceso de urbanización ha dado lugar a la ocupación en suelos no aptos, lo que contribuye a poseer distintos grados de peligro y riesgo. En ese contexto resulta indispensable identificar eso espacios geográficos, para disminuir o evitar la exposición de los asentamientos humanos a condiciones de riesgo, así como para disminuir su vulnerabilidad.

El ordenamiento territorial y la regulación del crecimiento urbano es una herramienta fundamental para una adecuada gestión del riesgo: permite reducir sus escenarios actuales y evitar la construcción de escenarios futuros expuestos a amenazas.

Bajo este contexto se muestra en la figura 51, la distribución de uso de suelo para la ciudad de Tulum partiendo de su traza urbana actual y sobreponiendo los usos establecidos dentro del documento Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030.

Figura 51. Zonificación por uso de suelo, Tulum, Quintana Roo



Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

4.3.3.6. Niveles de construcción

Los niveles de construcción permitidos establecen el número máximo de pisos que se pueden construir en un inmueble, y se encuentran relacionados a los usos de suelo (tabla 53 y figura 52).

De acuerdo con el uso de suelo definido en la tabla 53 se identifica como el primer uso el "Habitacional" que a su vez se clasifica por su tipo de densidad, en la siguiente tabla se muestra el tipo de densidad, su altura máxima y sus niveles de acuerdo con su clasificación.

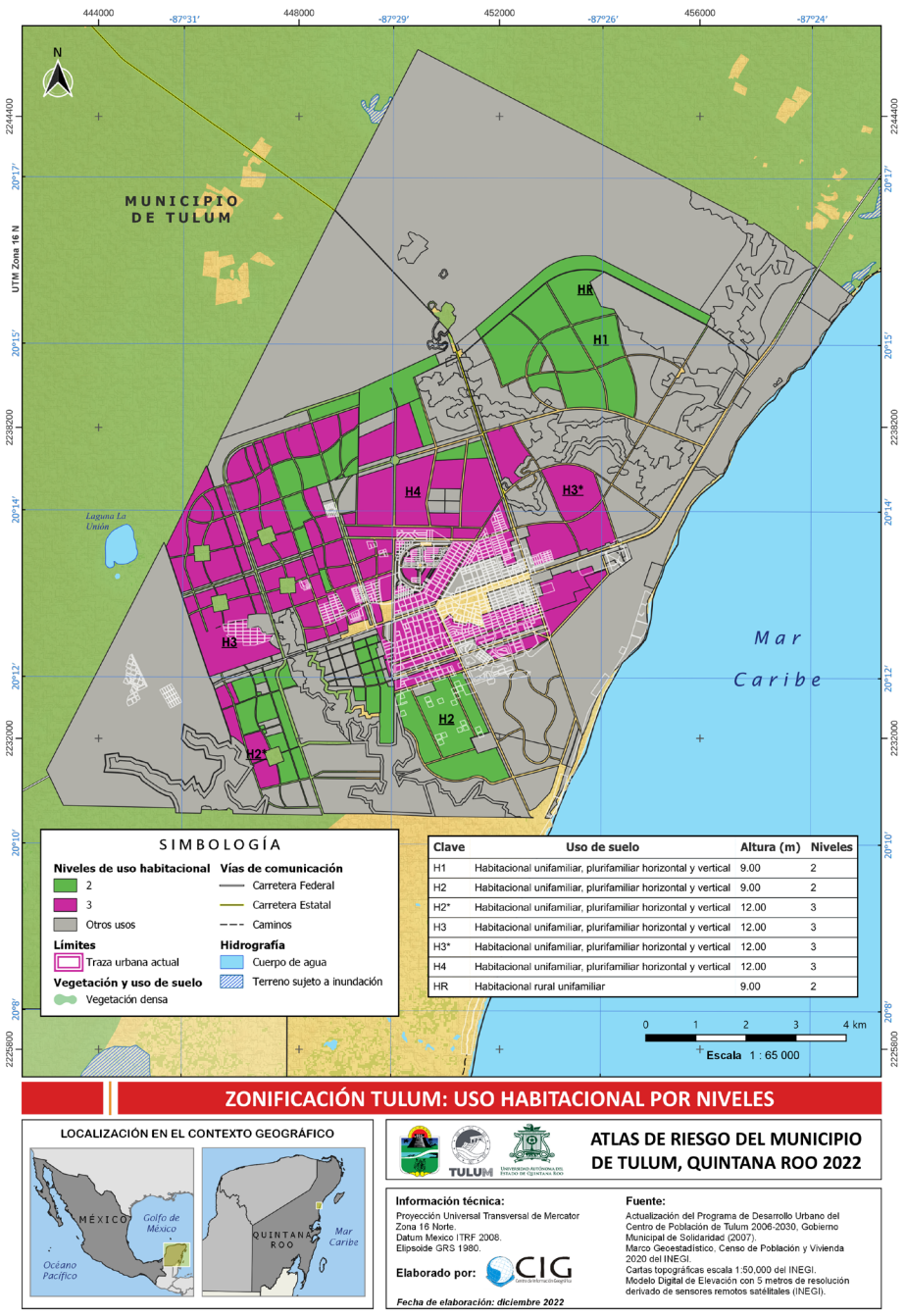
Tabla 53. Niveles de construcción para uso habitacional

Clasificación		Densidad tipo	Alturas	
			Metros	Niveles (pisos)
HR	Unifamiliar	Baja	9	2
H1	Unifamiliar		9	2
H1	Plurifamiliar Horizontal		9	2
H1	Plurifamiliar Vertical		9	2
H2	Unifamiliar	Media Baja	9	2
H2	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		9	2
H2*	Unifamiliar		12	3
H2*	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		12	3
H3	Unifamiliar	Media Alta	12	3
H3	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		12	3
H3*	Unifamiliar		12	3
H3*	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		12	3
H4	Unifamiliar	Alta	12	3
H4	Plurifamiliar Horizontal		12	3

Nota: HR: Habitacional Rural; H1: Habitacional Densidad Baja 6 viviendas/ha; H2: Habitacional Densidad Media Baja 12 viviendas/ha; H2*: Habitacional Densidad Media Baja 16 viviendas/ha; H3: Habitacional Densidad Media Alta 24/viviendas/ha; H3* Habitacional Densidad Media Alta 37 viviendas/ha; H4: Habitacional Densidad Alta 60 viviendas/ha.
Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

En la figura 52 se puede observar la distribución planeada del uso de suelo para el uso habitacional. Se muestran por tipo, niveles y alturas máximas permitidas. No obstante, se advierten espacios geográficos aun no urbanizados, pero ya definido su uso de suelo y niveles de 2 y 3 (zonas en color verde y rosa). También, dentro de la traza urbana para la ciudad de Tulum, podemos ver que el uso habitacional actual corresponde a la clave H4 (centro) y hacia Este con la clave H3, para ambas se especifica una altura máxima de 12 metros y 3 niveles.

Figura 52. Zonificación habitacional por niveles



Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

Para los otros usos, los niveles (pisos) se identifica como sigue:

Uso de suelo **MA** (Monumentos/Sitio Arqueológicos) no está permitida construcción alguna por lo que el nivel y altura máxima es nula.

Para la *Preservación Ecológica Ríos Subterráneos* (**PERS**), la cual está definida como superficie conservación con el objetivo evitar la expansión física en sitios con fragilidad y riqueza ambiental, sin embargo, se permite la instalación de elementos constructivos para la realización de actividades especificadas que no excederán el 7% de la superficie del predio y con solo 1 nivel constructivo y máximo 5 metros de altura.

En su caso la **PEFF** (Preservación Ecológica Flora y Fauna) el nivel permitido es 1 y la altura máxima 5 metros, pero solo se permiten construcciones no urbanas y vivienda de baja densidad de tipo rural (HR). Al igual que para *Parques* (**P**) solo un nivel y 5 metros de altura con un uso de solo 7% del total del predio.

Tanto para el área comercial **C** (Comercial Barrial/Central), el **M**: *Mixto comercial/habitacional*, el **E**: *Equipamiento Institucional/Regional*, el *Industrial* (**I**) y el *Subcentro urbano* (**SC**) son 3 niveles con una altura máxima de 12 metros.

En cuanto al uso Turístico (**T**) éste comprende dos tipos: el turístico hotelero y el turístico residencial, éstos a su vez se clasifican por tipo, que da su altura y el máximo de niveles (tabla 54).

En la primera categoría se señalan densidades hoteleras de 2.5, 5, 10, 15 y 40 cuartos por hectárea; la segunda categoría establece en conjunto con las zonificaciones turístico residencial (**TR1b, TR1 y TR2**) con densidades de 20, 25 y 30 cuartos por hectárea respectivamente.

Los Turísticos Hoteleros de densidad muy baja, son aquellos cuya densidad máxima es de 2.5 y 5 cuartos hoteleros por hectárea y corresponden a la clave **TH1** y **TH1*** respectivamente.

Turístico Hotelero densidad baja, son aquellos cuya densidad máxima es de 10 cuartos hoteleros por hectárea que corresponden a la clave **TH2**. Por su parte el Turístico Hotelero densidad media baja son aquellas cuya densidad máxima es de 15 cuartos hoteleros por hectárea que corresponden a la clave **TH3**.

Se señala también, la Turístico Hotelero densidad media, este uso comprende dos tipos de densidades, por un lado, **TH4** con 20 cuartos por hectáreas, y por otro el **TH4*** con 25 cuartos por hectárea.

Finalmente se tiene el Turístico Hotelero densidad alta, donde la densidad máxima es de 40 cuartos hoteleros por hectárea que corresponden a la clave **TH5** (tabla 54).

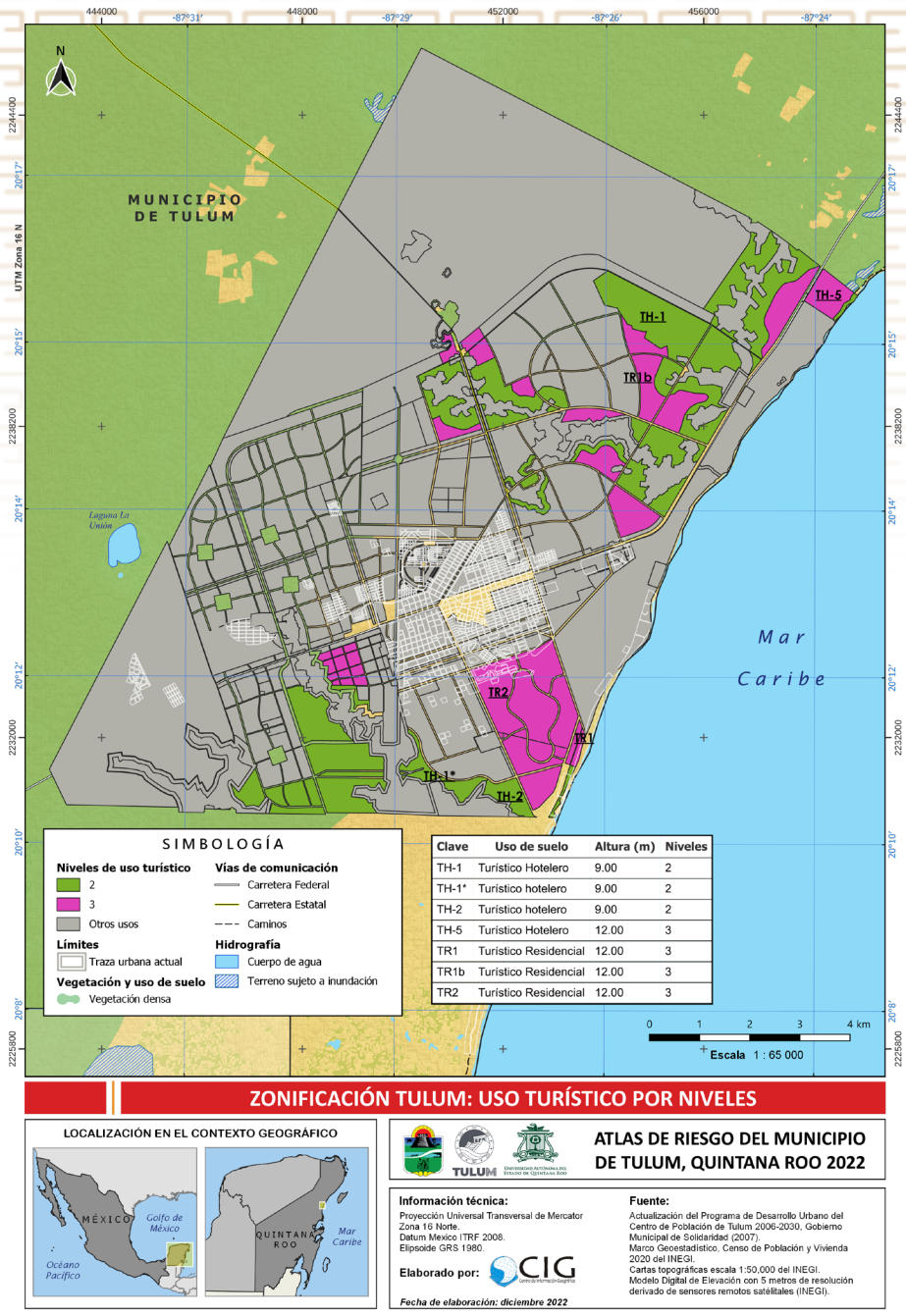
Tabla 54. Niveles de construcción para uso turístico

Clasificación		Densidad (cuartos/Ha)	Alturas	
			Metros	Niveles (pisos)
TR1b	Turístico Residencial densidad baja	20	12	3
TR1	Turístico Residencial densidad media	25	12	3
TR2	Turístico Residencial densidad alta	30	12	3
TH-1	Turístico Hotelero densidad muy baja	2.5	9	2
TH-1*	Turístico Hotelero densidad muy baja	5	9	2
TH-2	Turístico Hotelero densidad baja	10	9	2
TH-3	Turístico Hotelero densidad media baja	15	9	2
TH-4	Turístico Hotelero densidad media	20	9	2
TH-4*	Turístico Hotelero densidad media	25	9	2
TH-5	Turístico Hotelero densidad alta	40	12	3

* Se deberá preservar la calidad paisajística y ambiental con aprovechamientos turísticos sustentables de bajo impacto

Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

Figura 53. Zonificación turística por niveles



Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

4.3.3.7. Área libre

De acuerdo con las Normas y Disposiciones para Regular la Intensidad de Uso del Suelo en el instrumento Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007), existen dos tipos de normas las que regulan la intensidad de aprovechamiento del suelo para el centro urbano de la ciudad de Tulum:

1. El **Coeficiente Máximo de Ocupación de Suelo (COS)** que es la relación aritmética existente entre la superficie construida en planta baja y la superficie total del terreno y se calcula de la siguiente manera:

   COS = (1-% de área libre (expresado en número decimal)) /superficie total del predio.

   La superficie de desplante es el resultado de multiplicar el COS, por la superficie total del predio.

2. El **Coeficiente Máximo de Utilización del Uso del Suelo (CUS)** que expresa el número de veces que se puede construir la superficie del predio. Se calcula con la siguiente expresión:

   CUS = (superficie de desplante x número de niveles permitidos) / superficie total del predio

Por ejemplo, para el uso habitacional *"Uso Habitacional Rural 2.5 viviendas/ hectárea (solares mayas). Clave HR"*

- La superficie mínima del lote será de 10,000 metros cuadrados;
- El frente mínimo del lote no será menor de 50 metros lineales;
- El coeficiente de ocupación del suelo (COS) no será mayor de 0.50 y la superficie edificable no deberá ocupar más del 5% de la superficie total del lote.

- El coeficiente de utilización del suelo (CUS) no deberá ser superior a 0.10, y la superficie edificable no deberá ocupar más del 10% de la superficie total del lote.

Las características de las construcciones se sujetarán a los parámetros de intensidad de ocupación y utilización de acuerdo con las densidades de ocupación, los coeficientes de ocupación y utilización. La superficie máxima construida en los predios será la que se determine de acuerdo con la zonificación y a las intensidades de uso de suelo definidas en el PDU vigente (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

4.3.3.8. Densidad de vivienda

Las zonas habitacionales están destinadas a la construcción de viviendas unifamiliares o conjuntos habitacionales que cuentan con los servicios necesarios para cumplir su función. En la tabla 53 se expuso los niveles y alturas máximas permitidas por tipo de clasificación habitacional y su densidad de manera cualitativa.

Partiendo de lo anterior, en la tabla 55 se presenta la densidad de vivienda para la ciudad de Tulum de acuerdo con la clasificación habitacional definida en Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007), tanto cualitativamente (baja, media-baja, media-alta, alta) como cuantitativamente (viviendas/ha).

Tabla 55. Densidad de vivienda para uso habitacional

Clasificación		Densidad tipo	Densidad por viviendas/ha
HR	Unifamiliar	Baja	2
H1	Unifamiliar		6
H1	Plurifamiliar Horizontal		6
H1	Plurifamiliar Vertical		6
H2	Unifamiliarw	Media Baja	12
H2	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		12
H2*	Unifamiliar		16
H2*	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		16
H3	Unifamiliar	Media Alta	24
H3	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		24
H3*	Unifamiliar		37
H3*	Plurifamiliar Horizontal y Vertical		37
H4	Unifamiliar	Alta	60
H4	Plurifamiliar Horizontal		60

Nota: HR: Habitacional Rural; H1: Habitacional Densidad Baja 6 viviendas/ha; H2: Habitacional Densidad Media Baja 12 viviendas/ha; H2*: Habitacional Densidad Media Baja 16 viviendas/ha; H3: Habitacional Densidad Media Alta 24/viviendas/ha; H3* Habitacional Densidad Media Alta 37 viviendas/ha; H4: Habitacional Densidad Alta 60 viviendas/ha.
Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

La distribución de densidades habitacionales se puede observar también en la figura 55, ya que estas siguen la clasificación del uso habitacional definido. Por ejemplo, para la H4, tanto la unifamiliar como plurifamiliar horizontal tienen una densidad alta de 60 viviendas por hectárea. En contraste, las HR (Habitacional Rural) solo tiene una densidad de 2 viviendas por hectárea.

Las mayores densidades se ubican al centro de la ciudad y las de menor densidad se localizan mucho más alejadas del centro, pero más cercanas a las zonas de conservación y reserva ambiental (figura 52).

4.3.4. Empleo e ingresos

Desde la perspectiva del mundo laboral, se debe tomar en cuenta la fragilidad de los mercados de trabajo y la gobernanza, con la pandemia de COVID-19 se pudo constatar que los niveles económicos descendieron y se perdieron muchos empleos, afectando el ingreso de las personas.

La carencia de mecanismos eficientes de preparación y atención de emergencias para hacer frente a los desastres puede crear dificultades y demoras en la respuesta de los gobiernos hacia las poblaciones, lo que podría agravar las consecuencias en términos de pérdidas humanas y económicas. La desaparición de infraestructura productiva paraliza o retarda la actividad económica en general, afectando los niveles de ingreso y empleo de la población del sector laboral formal o informal.

Al mismo tiempo, aunque la exposición de la población y de los activos físicos a los desastres sigue en crecimiento, es poca la atención que se da a la construcción de una sociedad resiliente ante fenómenos naturales adversos. Por lo que se hace importante conocer el estado actual del empleo y sectores productivos de los municipios y sus localidades.

En México el INEGI, a través de su Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), es la instancia encargada de obtener información estadística sobre las características ocupacionales de la población de 15 años y más a nivel nacional, por entidad federativa y ciudades, así como de variables demográficas y económicas para el análisis de la fuerza de trabajo, la toma de decisiones, el diseño y seguimiento de las políticas laborales.

En esta sección se analizan los sectores económicos con el indicador de porcentaje de ocupación para el municipio de Tulum, la población económicamente activa, la tasa de desempleo abierto y la dependencia económica.

4.3.4.1. Sectores económicos

El INEGI a través de los Indicadores laborales para los municipios de México 2020, estimó las características laborales sobre la Población Económicamente Activa, la Población Ocupada y la Población no Ocupada Informal a un nivel de desagregación municipal, por lo que es la fuente principal de esta sección (INEGI, s.f.).

Los sectores productivos, o los sectores de la economía, se utilizan para establecer una clasificación de la actividad económica de una región en función del tipo de proceso productivo que la caracteriza. El ordenamiento de los sectores en México se basa en el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, SCIAN. Actualmente en México se emplea el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2018 (SCIAN 2018) y tiene su base en la agrupación tradicional de actividades económicas en tres grandes grupos: actividades primarias, secundarias y terciarias.

Como se aprecia en la siguiente tabla el primer sector corresponde a las actividades primarias, relacionadas con el aprovechamiento directo de los recursos naturales; el segundo sector comprende las actividades mediante las cuales se efectúa la transformación de todo tipo de bienes o productos, identificado como sector secundario, y el último sector de actividades corresponde a las terciarias, que se refieren al comercio y a los servicios (INEGI, 2018).

Tabla 56. Sectores SCIAN MÉXICO

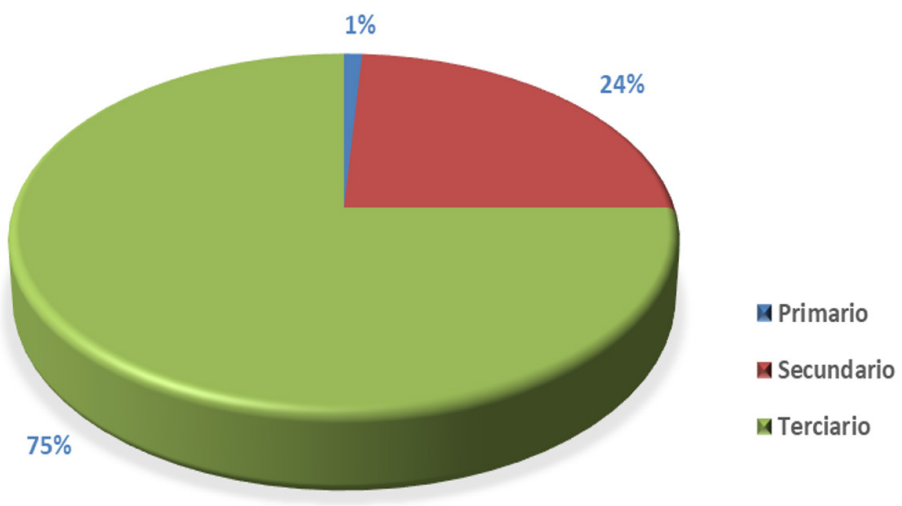
Agrupación	Características generales	Sector
Actividades primarias	Explotación de recursos naturales	Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza
Actividades secundarias	Transformación de bienes	Minería Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, suministro de agua y de gas natural por ductos al consumidor final Construcción Industrias manufactureras

Agrupación	Características generales	Sector
Actividades terciarias	Distribución de bienes	Comercio al por mayor
		Comercio al por menor
		Transportes, correos y almacenamiento
	Operaciones con información	Información en medios masivos
	Operaciones con activos	Servicios financieros y de seguros
		Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles
	Servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia del personal	Servicios profesionales, científicos y técnicos
		Corporativos
		Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos y desechos, y servicios de remediación
		Servicios educativos
		Servicios de salud y de asistencia social
	Servicios relacionados con la recreación	Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos
		Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas
	Servicios residuales	Otros servicios excepto actividades gubernamentales
	Actividades gubernamentales	Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales

Fuente: INEGI (2018). Estructura del Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN 2018).

Bajo este esquema se muestra la distribución de los puestos de trabajo ocupados por la población mayor de 15 años en el sector primario, sector secundario y sector terciario en el municipio de Tulum (Gráfico 2).

Gráfica 2. Proporción de la población de 15 años y más ocupada por sector económico.



Fuente: INEGI. (s.f.). Indicadores laborales para los municipios de México 2020. Estimación en áreas pequeñas.

Como bien se sabe, Tulum centra su actividad económica en su sector terciario (75%), principalmente, en las actividades relacionadas con el turismo, tales como los servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas. El secundario tiene su eje en la construcción e industrias manufactureras, debido a su crecimiento y expansión hotelera, y finalmente, su sector primario es el que menos población ocupada tiene con solo un 1%.

Según datos del Censo Económico 2019 (INEGI, 2019), los sectores económicos que concentraron más unidades económicas en Tulum fueron Comercio al por menor (833 unidades), Servicios de Alojamiento Temporal y de Preparación de Alimentos y Bebidas (610 unidades) y Otros Servicios Excepto Actividades Gubernamentales (190 unidades).

4.3.4.2. Población Económicamente Activa

El concepto de Población Económicamente Activa (PEA) fue introducido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1958 en sus principios y recomendaciones relativos a los censos de población de 1960, tal como señala Peralta (2016), el "Centro Latinoamericano de Demografía, define a la PEA como "grupo constituido por todas las personas, de uno u otro sexo, que suministran la mano de obra disponible para la producción de bienes y servicios"; producción que hoy se estima con el Producto Interno Bruto (PIB).

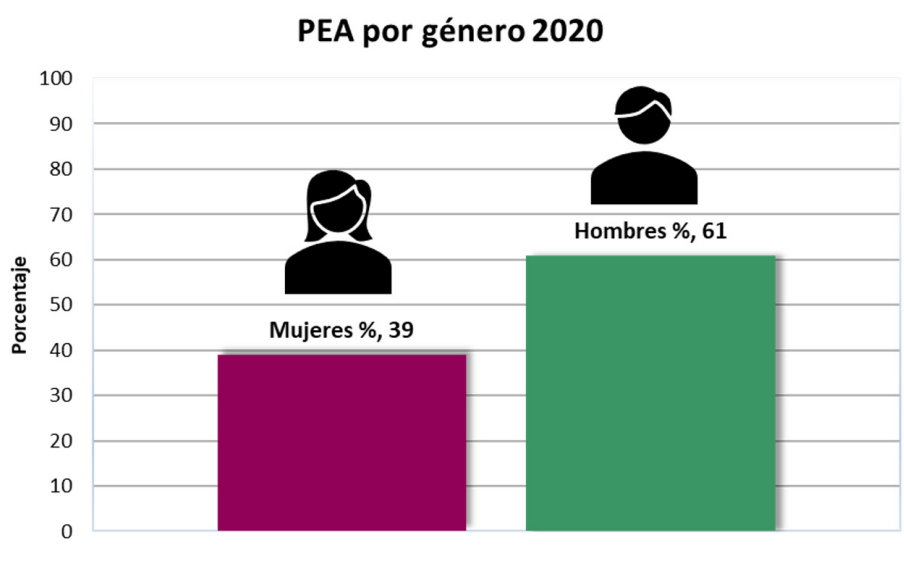
La PEA incluye personas con y sin ocupación; los grupos llamados de ocupación están conformados por quienes dependen de un empleador, también lo constituyen aquellas personas que trabajan por cuenta propia, como en el sector informal (Peralta, 2016). Por otro lado, la desocupación, incluye a quienes buscan un trabajo sin vincularse aún a una actividad productiva

Por otro lado, y de acuerdo con el INEGI, la Población Económicamente Activa (PEA), se define como el "Conjunto de personas que constituyen la mano de obra disponible para la producción de bienes y servicios. Es decir, la integran las personas que tienen una ocupación o que sin tenerla la están buscando activamente. Está compuesta por la población ocupada más la población desocupada" (INEGI, 2020).

Sin embargo, la PEA se define en la descripción del banco de datos de los "Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020a) como: "Personas de 12 a 130 años de edad que trabajaron, tenían trabajo, pero no trabajaron o buscaron trabajo en la semana de referencia".

Bajo este contexto, se expone a la PEA para el municipio de Tulum para 2020. De un total de población 46,721 personas solo 25,969 componen la ocupación laboral, lo que equivale a un 55.58% del total de la población. De éstas, 10,134 (39%) son mujeres y 15,835 (61%) son hombres (gráfico 3). En contraste, la PNEA (Población No Económicamente Activa), integrada por "las personas que menores no escolarizados, estudiantes y escolares, personas dedicadas a las labore del hogar, incapacitados permanentes para el trabajo, retirados, jubilados o pensionados", fue de 9,584 personas, casi equivalente a la fuerza laboral femenina del municipio, de éstas 6,745 fueron mujeres y 2,839 fueron hombres.

Gráfica 3. Población Económicamente Activa (PEA), municipio Tulum, 2020.



Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

En la tabla siguiente de muestra la PEA por género y también la PNEA para 2020, para las localidades del municipio con más de tres viviendas, porque son las que disponen de información.

Tabla 57. PEA y PNEA para Tulum y sus localidades, 2020

Nombre localidad	Población Total	PEA	%	PEA Mujeres	%	PEA Hombres	%	PNEA	%	PNEA Mujeres	%	PNEA Hombres	%
Cenote Calavera	7	7	100.0	2	28.6	5	71.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Kirabo	6	6	100.0	4	66.7	2	33.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Lum Ha [Lotes]	9	8	88.9	3	37.5	5	62.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Tres Hermanos	18	15	83.3	6	40.0	9	60.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Kilómetro Doce	40	32	80.0	17	53.1	15	46.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0
India Blanca	19	15	78.9	7	46.7	8	53.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
La Ceiba	45	33	73.3	13	39.4	20	60.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Akumal Sur	15	11	73.3	6	54.5	5	45.5	2	13.3	2	100.0	0	0.0
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	11	73.3	5	45.5	6	54.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
La Unión	62	45	72.6	20	44.4	25	55.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Las Dos Hermanas	18	13	72.2	5	38.5	8	61.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Hondzonot	391	279	71.4	135	48.4	144	51.6	15	3.8	5	33.3	10	66.7
Chanchén Palmar	597	418	70.0	210	50.2	208	49.8	6	1.0	2	33.3	4	66.7
Yaxché	367	256	69.8	120	46.9	136	53.1	17	4.6	11	64.7	6	35.3
Bahías de Punta Solimán	56	39	69.6	14	35.9	25	64.1	5	8.9	4	80.0	1	20.0
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	266	67.7	117	44.0	149	56.0	59	15.0	46	78.0	13	22.0
El Pequeño Paraíso	34	23	67.6	11	47.8	12	52.2	4	11.8	3	75.0	1	25.0
Paraíso [Rancho]	9	6	66.7	4	66.7	2	33.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Sahcab Mucuy	596	397	66.6	202	50.9	195	49.1	20	3.4	9	45.0	11	55.0
Alfa y Mega	16	10	62.5	8	80.0	2	20.0	3	18.8	1	33.3	2	66.7
Tankah Tres	62	38	61.3	17	44.7	21	55.3	13	21.0	9	69.2	4	30.8
Chan Chemuyil	127	77	60.6	29	37.7	48	62.3	43	33.9	26	60.5	17	39.5
Cafeto Cimarrón	15	9	60.0	5	55.6	4	44.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
La Unión*	74	44	59.5	23	52.3	21	47.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Ciudad Chemuyil	548	324	59.1	148	45.7	176	54.3	124	22.6	83	66.9	41	33.1
Chanchen Primero	1,078	637	59.1	303	47.6	334	52.4	133	12.3	93	69.9	40	30.1
Tulum	33,374	18,902	56.6	7,371	39.0	11,531	61.0	6,737	20.2	4,689	69.6	2,048	30.4
Akumal	2,154	1,197	55.6	480	40.1	717	59.9	461	21.4	307	66.6	154	33.4
Balam Luum	11	6	54.5	3	50.0	3	50.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
India Blanca	26	14	53.8	8	57.1	6	42.9	1	3.8	0	0.0	1	100.0
Jacinto Pat	100	53	53.0	15	28.3	38	71.7	24	24.0	18	75.0	6	25.0
Marités*	36	19	52.8	8	42.1	11	57.9	8	22.2	8	100.0	0	0.0
Cristal [Colonia]*	352	176	50.0	57	32.4	119	67.6	74	21.0	57	77.0	17	23.0
Árboles Tulum	20	10	50.0	1	10.0	9	90.0	6	30.0	5	83.3	1	16.7
Yolis	10	5	50.0	0	0.0	5	100.0	5	50.0	3	60.0	2	40.0
Don Brígido	33	16	48.5	6	37.5	10	62.5	12	36.4	9	75.0	3	25.0
Macario Gómez	884	410	46.4	138	33.7	272	66.3	207	23.4	165	79.7	42	20.3
Manuel Antonio Ay	621	269	43.3	73	27.1	196	72.9	185	29.8	149	80.5	36	19.5
Océano Azul	12	5	41.7	3	60.0	2	40.0	5	41.7	2	40.0	3	60.0
Cobá	1,738	696	40.0	220	31.6	476	68.4	582	33.5	412	70.8	170	29.2
Aventuras Akumal	15	6	40.0	4	66.7	2	33.3	9	60.0	4	44.4	5	55.6
Balam Canché	5	2	40.0	2	100.0	0	0.0	3	60.0	2	66.7	1	33.3
Yax'muul [Rancho]	5	2	40.0	0	0.0	2	100.0	3	60.0	2	66.7	1	33.3
Francisco Uh May	1,288	510	39.6	135	26.5	375	73.5	396	30.7	296	74.7	100	25.3
Gran Bahía Príncipe	29	11	37.9	7	63.6	4	36.4	9	31.0	4	44.4	5	55.6
Dos Palmas	32	12	37.5	5	41.7	7	58.3	11	34.4	6	54.5	5	45.5
Punta Sur	16	6	37.5	3	50.0	3	50.0	4	25.0	2	50.0	2	50.0
San Juan	770	271	35.2	44	16.2	227	83.8	296	38.4	234	79.1	62	20.9
San Pedro	136	38	27.9	5	13.2	33	86.8	50	36.8	40	80.0	10	20.0
Total	**40,145**	**23,118**	**57.6**	**9,285**	**40.2**	**13,833**	**59.8**	**7,642**	**19.0**	**5,290**	**69.2**	**2,352**	**30.8**

Nota: Las localidades con * forman parte de la traza urbana de la ciudad de Tulum.
Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

En la tabla 56 se observa que son dos localidades las que su PEA es el 100% de las personas que las habitan; las siguientes once van de una PEA entre el 70% al 90%. Las siguientes 22 van del 50% a un 69%, y las 14 localidades restantes tienen una PEA menor al 50%.

En cuanto a la PEA por género, se advierte que la Población Económicamente Activa se concentra en la población masculina. Por ejemplo, en la localidad de Akumal Sur la PNEA son solo mujeres, al igual que en Marités, aunque esta ultima se considera colonia de la ciudad de Tulum (tabla 56).

4.3.4.3. Desempleo

La falta de empleo ha sido, por muchos años, el problema social más grave de México es uno de los indicadores que más acentúa la pobreza (Ruiz & Ordaz, 2011).

Los indicadores de Tasa de Empleo y Tasa de Desempleo permiten distinguir las condiciones del mercado laboral.

La primera, se puede definir como la razón entre la población ocupada y la población económicamente activa (que está en condiciones de formar parte del mercado laboral). Permite indicar qué porcentaje de trabajadores tienen efectivamente empleo.

En este sentido, se calcula la Tasa de Empleo para el municipio de Tulum y sus localidades, aplicando la fórmula siguiente:

$$\text{Tasa de empleo} = \frac{\text{Población ocupada}}{\text{PEA}} X\ 100$$

El resultado muestra que para el municipio de Tulum la Tasa de Empleo fue de 99.22%, es decir, que 99 de cada 100 personas económicamente activas tienen empleo (tabla 57).

Tabla 58. Personas con empleo, municipio de Tulum 2020

Tasa de Empleo			
Población ocupada	25,767	X 100 =	99.22%
PEA	25,969		

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Por género la tasa de empleo queda de la siguiente manera (tabla 58): 99.13% para hombres y 99.36% para mujeres.

Tabla 59. Hombres y mujeres con empleo, municipio de Tulum 2020

Tasa de Empleo por género: Hombres			
Población ocupada masculina	15,698	X 100 =	99.13%
PEA hombres	15,835		
Tasa de Empleo por género: Mujeres			
Población ocupada femenina	10,069	X 100 =	99.36%
PEA mujeres	10,134		

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Ahora bien, a nivel localidad este porcentaje varia mínimamente, por ejemplo, se puede observar en la tabla 53 que solo en ocho localidades la Tasa de empleo no llega al 100% pero se encuentra muy cercana.

Tabla 60. Tasa de Empleo por localidad, municipio Tulum 2020

Nombre localidad	POBTOT	PEA	POCUPADA	Tasa de Empleo
Akumal Sur	15	11	11	100.00
Aventuras Akumal	15	6	6	100.00
Gran Bahía Príncipe	29	11	11	100.00
Bahías de Punta Solimán	56	39	39	100.00
Balam Canché	5	2	2	100.00
Chanchén Palmar	597	418	418	100.00
Chan Chemuyil	127	77	77	100.00
Las Dos Hermanas	18	13	13	100.00
Dos Palmas	32	12	12	100.00
Hondzonot	391	279	279	100.00
Jacinto Pat	100	53	53	100.00
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	393	266	266	100.00
El Pequeño Paraíso	34	23	23	100.00
Kirabo	6	6	6	100.00
Manuel Antonio Ay	621	269	269	100.00
Sahcab Mucuy	596	397	397	100.00
Alfa y Mega	16	10	10	100.00
Tankah Tres	62	38	38	100.00
Tres Hermanos	18	15	15	100.00
Yaxché	367	256	256	100.00
Balam Luum	11	6	6	100.00
Cenote Calavera	7	7	7	100.00
India Blanca	19	15	15	100.00
La Ceiba	45	33	33	100.00
La Unión	74	44	44	100.00
La Unión	62	45	45	100.00
Yolis	10	5	5	100.00
Cafeto Cimarrón	15	9	9	100.00
India Blanca	26	14	14	100.00
Punta Sur	16	6	6	100.00
Paraíso [Rancho]	9	6	6	100.00
Yax'muul [Rancho]	5	2	2	100.00
Árboles Tulum	20	10	10	100.00
San Pedro	136	38	38	100.00
Cristal [Colonia]	352	176	176	100.00
Cachito de Cielo	9	8	8	100.00
Marités	36	19	19	100.00
Don Brígido	33	16	16	100.00
Océano Azul	12	5	5	100.00
Kilómetro Doce	40	32	32	100.00
Lum Ha [Lotes]	9	8	8	100.00
Kilómetro Diez Punto Cinco	15	11	11	100.00
Akumal	2,154	1,197	1,195	99.83
San Juan	770	271	270	99.63
Cobá	1,738	696	693	99.57
Chanchen Primero	1,078	637	634	99.53
Tulum	33,374	18,902	18,739	99.14
Ciudad Chemuyil	548	324	319	98.46
Francisco Uh May	1,288	510	498	97.65
Macario Gómez	884	410	397	96.83

Nota: POBTOT: Población Total; PEA: Población Económicamente Activa; POCUPADA: Población Ocupada.
Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Por otro lado, el segundo indicador la Tasa de Desempleo, es el índice más habitual, ya que expone la cantidad de desempleados sobre la población económicamente activa.

Este índice se calcula bajo la fórmula siguiente:

$$\text{Tasa de desempleo} = \frac{\text{Población desocupada}}{\text{PEA}} \text{ X } 100$$

Aquí el resultado para el municipio de Tulum fue de solo el 0.78% (tabla 54), es decir, menos de 1 persona de cada 100 se encuentra desempleada.

Tabla 61. Personas con sin empleo, municipio de Tulum 2020

Tasa de Desempleo			
Población desocupada	202	X 100 =	0.78%
PEA	25,969		

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que estas estadísticas nunca son precisas. Una persona puede formar parte de la PEA y no tener trabajo porque no lo busca o no le interesa trabajar. Dicho individuo será considerado como un desempleado pese a que, tal vez, exista la oferta laboral suficiente para que forme parte del mercado.

4.3.4.4. Dependencia económica

La tasa de dependencia es un índice demográfico. Expresa la proporción de personas dependientes sobre la población activa, que esta en edad de trabajar. Este indicador es muy utilizado para conocer la sostenibilidad del sistema de pensiones. Esto se debe a que muestra la proporción de personas que, en edad de trabajar, financian una pensión.

De acuerdo con los censos nacionales de 1970 y 2020, en México la relación de dependencia disminuyó de 108 a 59 dependientes por cada 100 personas en edades productivas (INEGI, 2022a). Lo anterior, representa una ventaja o desventaja del bono demográfico, para las políticas económicas y sociales en los territorios, que depende de la capacidad que tiene la economía de un país para absorber productivamente a las personas que ingresan a la actividad económica y no simplemente del proceso demográfico.

Para Quintana Roo la razón de dependencia fue de 41.54% para 2020 (INEGI, 2020). Es decir, hay 42 personas por cada 100 personas en edades productivas.

Para conocer la Tasa de Dependencia Económica para el municipio de Tulum se emplea la siguiente formula:

$$\text{Tasa de dependencia} = \frac{\text{Población vieja (65 y más)} + \text{Población joven (0 a 14)}}{\text{Población adulta (15 a 64)}} \text{ X } 100$$

De esta manera la Tasa de Dependencia fue de 45.38% muy cercana a la del Estado de Quintana Roo (tabla 55).

Tabla 62. Tasa de dependencia económica, municipio de Tulum 2020

Dependientes teóricos sobre la población activa				
Población vieja (65 años y más)	**1,295**	+	Población joven (0 a 14 años)	**13,269**
Población adulta (15 a 64 años) **32, 093**				
X 100	=	**45.38%**		

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

En México los hogares de territorios rural-urbano pequeños presentan mayores tasas de dependencia tanto los encabezados por hombres como por mujeres.

A continuación, en la tabla siguiente se indica la Tasa de Dependencia Económica para las localidades del municipio de Tulum.

Se puede señalar que Punta Sur tiene una tasa de dependencia del 100%, por otro lado, se observa que son 27 localidades que se sitúan por arriba de la tasa municipal, es decir, tiene más de 45 personas dependientes

económicos por cada 100 en edad productiva. En contraste, existen 19 localidades con menor tasa de dependencia.

Tabla 63. Razón de dependencia económica para las localidades del municipio de Tulum, 2020

Nombre Localidad	POB0_14	POB15_64	POB65_MAS	Tasa de Dependencia Económica
Punta Sur	6	8	2	100.00
San Pedro	57	72	7	88.89
Cafeto Cimarrón	6	8	1	87.50
Balam Luum	5	6	0	83.33
Gran Bahía Príncipe	10	16	3	81.25
Paraíso [Rancho]	3	5	1	80.00
India Blanca	11	15	0	73.33
Dos Palmas	10	19	3	68.42
La Unión	30	44	0	68.18
Macario Gómez	330	526	28	68.06
Chanchén Palmar	213	356	28	67.70
Sahcab Mucuy	221	357	18	66.95
Kilómetro Diez Punto Cinco	4	9	2	66.67
Francisco Uh May	469	780	39	65.13
San Juan	265	470	35	63.83
Chanchen Primero	362	662	54	62.84
India Blanca	5	12	2	58.33
Cristal [Colonia]	123	223	6	57.85
Manuel Antonio Ay	203	398	20	56.03
Cobá	552	1124	62	54.63
Árboles Tulum	4	13	3	53.85
Hondzonot	108	255	28	53.33
Yaxché	108	244	15	50.41
Marités	12	24	0	50.00
La Unión	20	42	0	47.62
Akumal	615	1467	70	46.69
Alfa y Mega	4	11	1	45.45
La Ceiba	14	31	0	45.16
Don Brígido	8	23	2	43.48
Jacinto Pat	27	70	3	42.86
Tulum	9109	23444	759	42.09
Bahías de Punta Solimán	12	40	4	40.00
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	87	283	23	38.87
Las Dos Hermanas	5	13	0	38.46
Kilómetro Doce	9	29	2	37.93
Akumal Sur	2	11	2	36.36
Ciudad Chemuyil	122	406	20	34.98
Océano Azul	2	9	1	33.33
El Pequeño Paraíso	7	26	1	30.77
Tres Hermanos	4	14	0	28.57
Lum Ha [Lotes]	1	7	1	28.57
Yolis	0	8	2	25.00
Tankah Tres	11	50	1	24.00
Chan Chemuyil	10	106	11	19.81
Aventuras Akumal	0	13	2	15.38
Cachito de Cielo	1	8	0	12.50

Nota: POB0_14: Población de joven; POB15_64: Población adulta; POB65_MAS: Población vieja.

Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

4.3.5. Equipamiento e infraestructura

4.3.5.1. Salud

De acuerdo con el Diagnóstico situacional en materia de Salud para el año 2022 (SESA, 2022), en Quintana Roo las principales causas de morbilidad son las infecciones respiratorias agudas, las infecciones intestinales y las infecciones de vías urinarias; que en su conjunto representaron el 75% de los casos de enfermedad (569,423) en el año 2022. Por otra parte, 7 de las 10 causas de defunción principales fueron ocasionadas por enfermedades no transmisibles y representan el 65% del total de defunciones de ese año.

La infraestructura para atención a la salud es fundamental para garantizar un acceso adecuado y equitativo de atención médica de calidad, sobre todo para la población que tiene alguna situación de vulnerabilidad. De igual manera, los programas de vacunación, detección temprana y tratamiento ayudan a la prevención y control de las enfermedades mejorando las condiciones de salud y bienestar de la población.

Cabe señalar que el Sistena Nacional de Salud en México clasifica en tres niveles la atención a la salud, el primer nivel es el que brinda atención primaria y es el nivel más cercano a la población. Esta formado por unidades médicas ambulatorias (Consultorios) y en este nivel se tratan el 80% de los padecimientos de una población.

El segundo nivel corresponde a los hospitales generales donde se da atención de urgencias, hospitalización, procedimientos de complejidad media y tratamiento de pacientes referidos del primer nivel de atención.

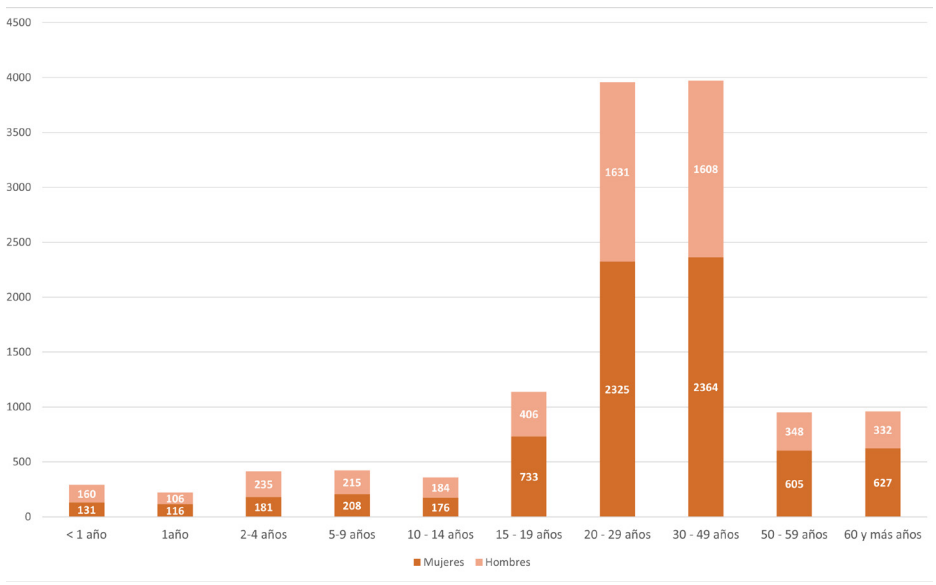
El tercer nivel corresponde a los hospitales de alta especialidad y subespecialidad, en ellos se atienden los casos de alto riesgo o complejos.

En el municipio de Tulum existen algunas instalaciones que brindan atención a la salud en el primer nivel. Los Centros de Salud de la Secretaria de Salud Estatal en el municipio son:

- Centro de salud urbano Tulum
- Centro de salud rural Chanchen I
- Centro de salud rural Cobá
- Centro de salud rural San Silverio
- Centro de salud rural Yalchén
- UNEME CAPA Tulum

De acuerdo con los Servicios Estatales de Salud (SESA) en el año 2022 se proporcionaron un total de 12,691 consultas médicas. De ellas, el 59% en atención a mujeres y el 41% restante a hombres. Los grupos de edad con mayor número de consultas fueron el grupo de 20 a 29 años y el de 30 a 40 años (ambos con el 31% del total).

Tabla 64. Consultas médicas por grupo de edad en el municipio de Tulum (2022).



Fuente: Elaboración propia a partir de SESA(2022)

Hay que señalar que el servicio de atención medica de segundo nivel mas cercano se encuentran en la ciudad de Playa del Carmen, se trata del Hospital General de esa ciudad.

En la localidad de Tulum se encuentra también una Unidad Médica Especializada en Centros de Atención en Adicciones (UNEME - CAPA) que brinda atención gratuita para la prevención y tratamiento de problemas relacionados con el consumo de drogas, a personas en riesgo.

4.3.5.2. Educativo

En 2020 el grado promedio de escolaridad en Quintana Roo de la población 15 a más años era de 10.2 años (un poco más de primer año de bachillerato). En Tulum es de 9.3 años (un poco más del último año de secundaria). El porcentaje de personas mayores de 15 años o más que saben leer y escribir es del 95.0% que es un poco menor al porcentaje estatal (96.6%), dentro de este mismo grupo de edad el 14.1% tiene instrucción de nivel superior. Otro indicador que señala un ligero rezago en materia de educación es el de que el 53.6% de la población de 15 años o más tiene un nivel de escolaridad básica.

En el municipio se tiene registro de 43 centros educativos, divididos en varios niveles de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 65. Centros educativos en el municipio de Tulum

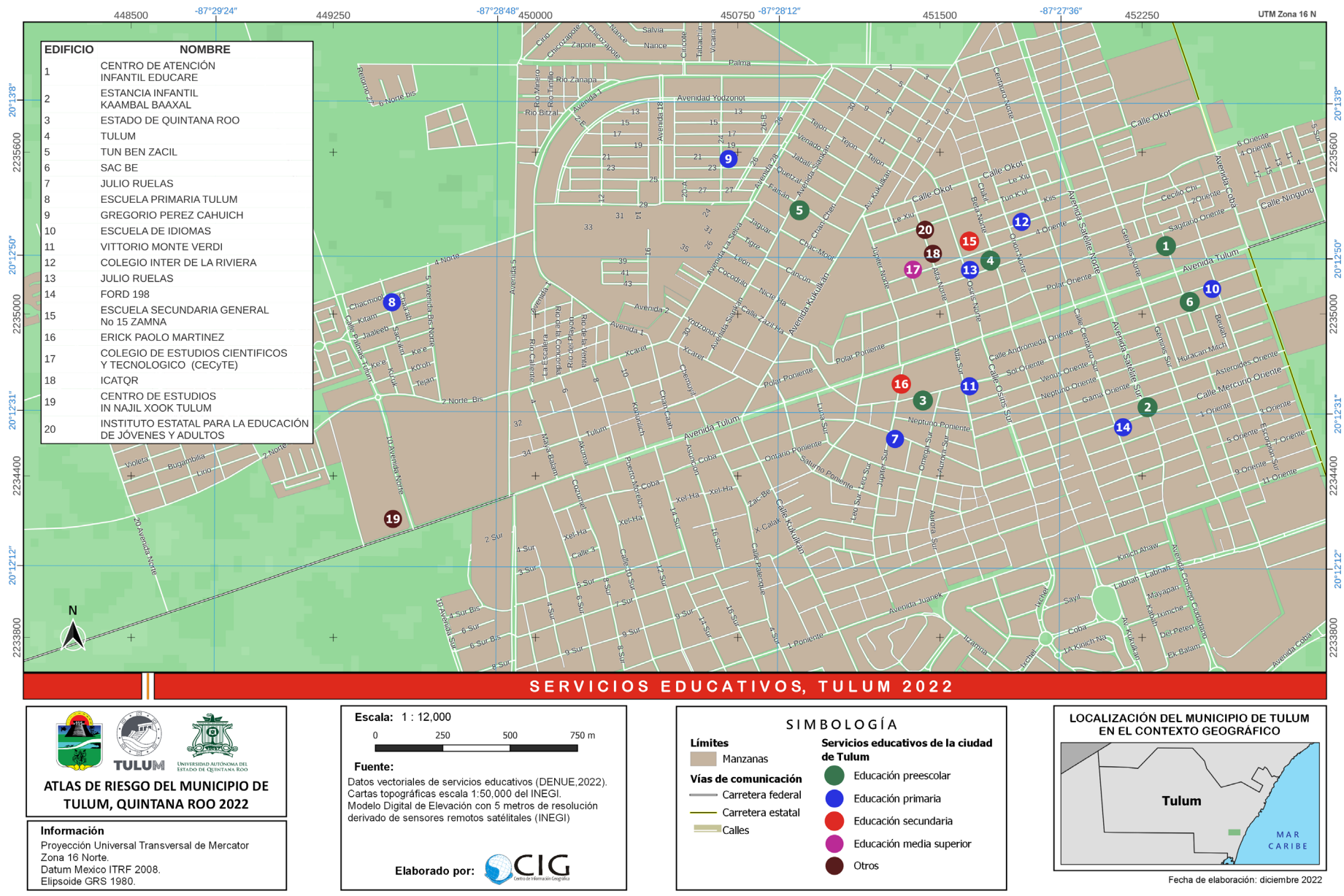
Tipo	Cantidad
Escuela de idiomas	1
Plaza comunitaria	1
Guardería	2
Instituto de capacitación	2
Media superior	2
Telebachillerato	2
Escuela secundaria	3
Telesecundaria	4
Jardín de niños	13
Escuela primaria	15

Fuente: Elaboración propia a partir del DENUE (2022c).

Como puede verse en la figura 54, la localización de las escuelas públicas todavía es algo dispersa y la infraestructura presenta deficiencias,los grados de escolaridad disponibles no son suficientes para el municipio que ahora tiene una dinámica de crecimiento acelerada.

De acuerdo con las normas y criterios internacionales uno de los parámetros para determinar la calidad de vida de un centro de población es el número de aulas en relación con sus habitantes, por lo que se le debe dar impulso a la creación de escuelas y generar más alumnos con educación media superior.

Figura 54. Centros educativos de la ciudad de Tulum



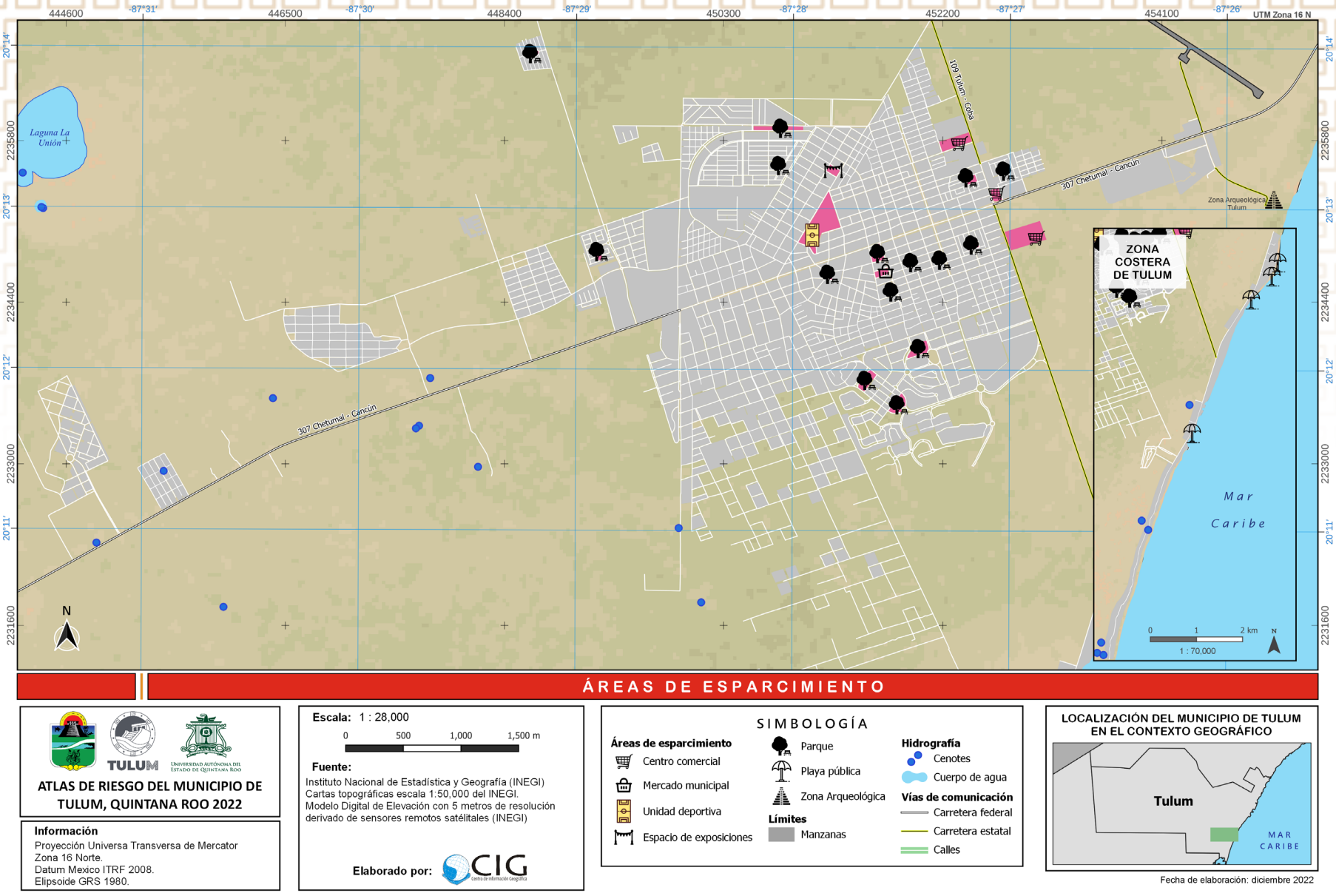
Fuente: Elaboración propia a partir del DENUE (2022c).

4.3.5.3. Recreativo y/o de esparcimiento (plazas, centros comerciales, teatros, cines, auditorios, etc.)

La ciudad de Tulum, como capital del municipio, es la localidad que agrupa una mayor cantidad de servicios. Se registra una superficie de 17.54 hectareas para parques urbanos en la ciudad de Tulum, esta superficie corresponde al 1.74% de la superficie de dicha localidad.

Está distribuida en 19 parques que tienen en promedio una superficie de 9,230 m². El parque urbano de mayor extensión es el denominado “Unidad Deportiva Tulum” con una superficie de 71,302 m².

Figura 55. Ubicación de los parques urbanos de la ciudad de Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.5.4. Bomberos, seguridad pública, gas y combustible, plantas de tratamiento, estaciones eléctricas, etc.

De acuerdo con el INEGI (2020c) el 97.5% de las viviendas en el municipio cuenta con el servicio de energia eléctrica, suministrado por la CFE. Este servicio se genera a través de la subestación eléctrica ubicada a 5 Km. de la ciudad de Tulum, sobre la carretera a Cobá, y es alimentada por una línea de alta tensión de 34.5 Kv. El tipo de tendido para la distribución de la misma es de tipo aéreo con postes de concreto armado.

Existe una central de teléfonos ubicada al centro de la localidad que da servicio a toda la zona. La localidad también cuenta con el servicio telegráfico que es precario.

Dentro del polígono municipal hay 19 estaciones de servicio de combustible (gasolineras, 11 de ellas en la localidad de Tulum, 1 más en la localidad de Cobá, otra a 5 kilómetros al noroeste de la localidad ed Tulum, sobre la carretera federal 109 Tulum-Coba y las 6 restantes al norte sobre la carretera federal 307 Cancún-Chetumal (figura 44).

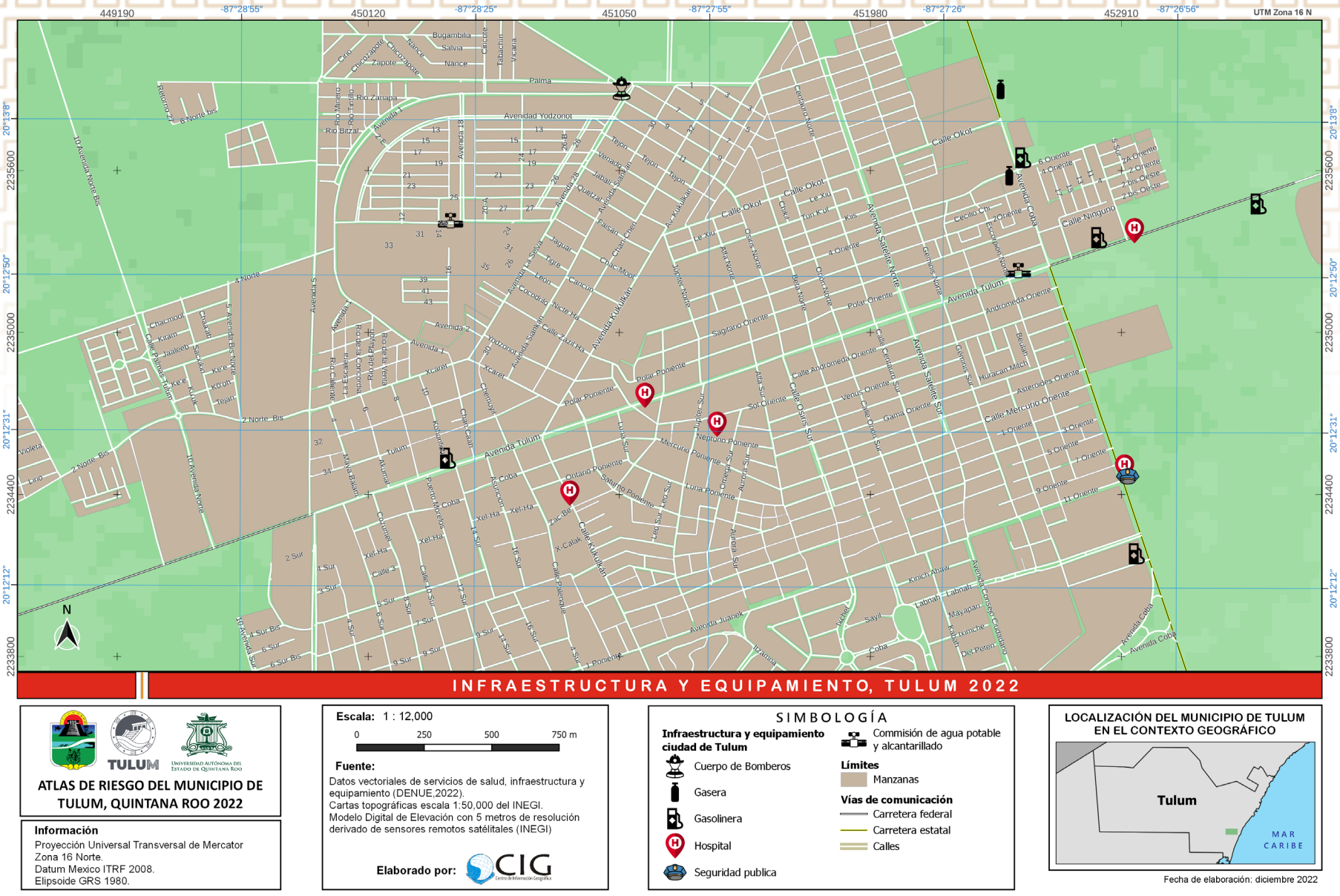
Cobá del lado oriente y poniente. Son las únicas instalaciones de riesgo, no se cuenta con una distribuidora de gas doméstico, siendo éste suministrado desde la ciudad de Cancún por medio de cilindros repartidos a domicilio a la población, y a la pequeña industria que hace uso del energético por medio de pipas - tanque.

Por otro lado, para el tratamiento de las aguas residuales residenciales se cuenta con 2 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) ubicadas en las localidades de Tulum y Akumal.

La PTAR de Tulum opera desde 2010 con una capacidad de que aumento en tres etapas hasta alcanzar en 2016 145 litros por segundo y un tiempo de vida proyectado en 50 años

La PTAR en Akumal, nombrada “Ak-Tun” (gruta en lengua maya), comenzó su operación en enero de 2021 con una capacidad de tratamiento de hasta 40 litros por segundo de aguas residuales y un tiempo de vida proyectado a 15 años.

Figura 56. Ubicación de la infraestructura de soporte en la localidad de Tulum.

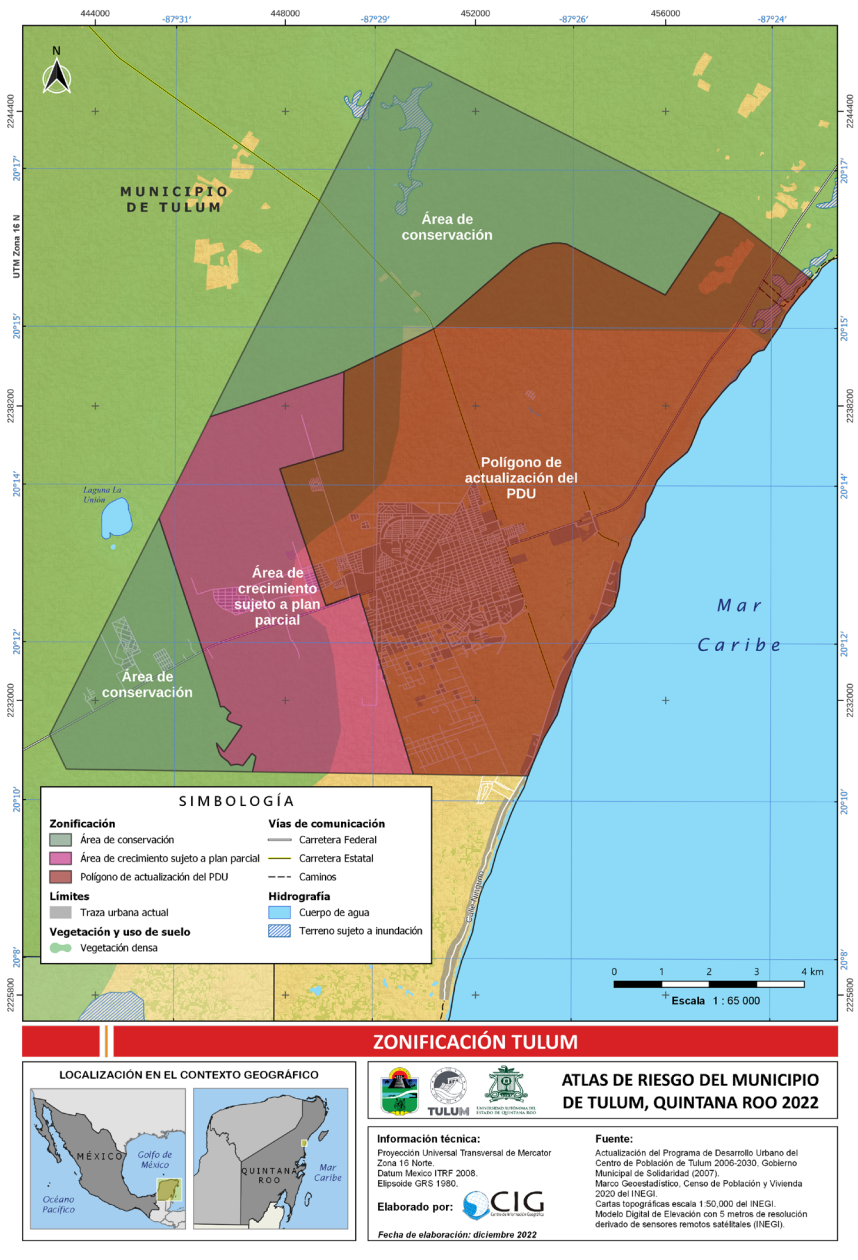


Fuente: Elaboración propia.

4.3.5.5. Reserva territorial

Para el polígono de reserva territorial se utilizó el Límite del Centro de Población (LCP) definido en el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Tulum 2006-2030. Este colinda al norte con el Ejido Jacinto Pat y terrenos de propiedad privada; al sur con la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an y terrenos del Ejido Pino Suárez; al oeste con el ejido de Tulum y al este con el Mar Caribe.

Figura 57. Reserva territorial.



Fuente: Elaboración propia.

El LCP incluye los polígonos original y ampliado del Fundo Legal y aquellas áreas de propiedad federal como sería el caso de las declaradas como Zona de Monumentos del Decreto Presidencial de 1993, y las declaradas como Parque Nacional, también por Decreto Presidencial de 1981. La razón de incluir estas dos últimas areas es que en necesario que las autoridades municipales tambien regulen el uso de ellas.

El área del LCP tiene una extensión de 13,655.35 hectáreas. Como puede observarse en la figura 42, existe una superficie de 4,405.34 has destinadas a la conservación (32.92%), un área de crecimiento sujeta a un plan parcial con una superficie de 2,505.69 has (18.35%) y un polígono de desarrollo urbano de 6,654.80 (48.74%).

En la superficie destinada al desarrollo urbano se ha establecido una superficie de 4,565.96 hectáreas para usos habitacionales con distintas densidades que van desde las 2 viviendas hasta 60 viviendas por hectárea que albergarán un total de 45,313 viviendas para 181,250 habitantes. De acuerdo al PDU(2006 - 2030) se estima que para el año 2030 la tasa de crecimiento anual pase de 14.9% a 5.7% por lo que se requiere que para esa fecha se hayan incorporado 45,313 viviendas en una superficie de 2,919.43 has.

4.3.5.6. Expansión de la mancha urbana 1980 a 2022.

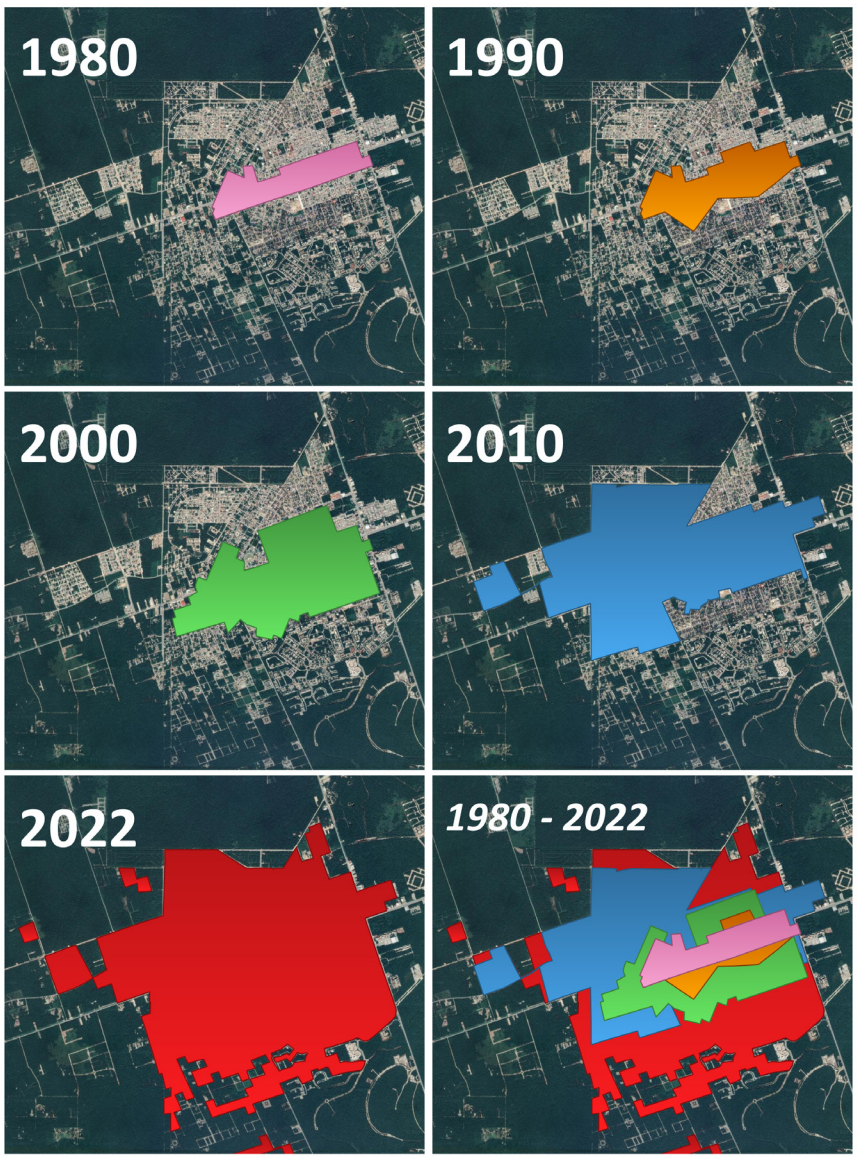
Tendencia de crecimiento urbano hacia la zona sureste en ambos lados de la Carretera federal 307

Tabla 66. Superficie urbanizada

Año	Superficie (km²)
1980	0.83
1990	1.16
2000	2.70
2010	5.30
2020	11.65

Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Crecimiento de la ciudad de Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.6. Asentamientos irregulares

La falta de una oferta de suelo accesible origina la ocupación informal de asentamientos humanos localizados en suelo ejidal en el que, a pesar de contar con títulos de posesión, sus habitantes han carecido por años de la seguridad jurídica de la propiedad, excluyéndolos así del acceso a los beneficios que ofrece la urbanización. Otra de las causas es la especulación del uso, principalmente en ciudades turísticas o con una gran dinámica económica.

La ocupación irregular además ha sido causada por la expectativa de desregulación de la tierra ejidal que fue concretada con la Ley Agraria de 1992, que genera una especulación sobre los usos y precios del mercado formal en las periferias urbanas, reduciendo así la oferta de suelo para los grupos de población de menor ingreso (Iracheta, 2015, cit. INSUS, 2020).

Por lo tanto, se hace necesario realizar intervenciones integrales, generando una oferta de suelo adecuado para las familias de menores ingresos con alternativas reales de ocupación del suelo informal, y que vinculen la regularización con la mitigación de otro tipo de carencias y rezagos sociales, como el acceso a servicios básicos, seguridad, mejoramiento de vivienda, transporte, equipamiento, espacios públicos, entre otros, así como también la reducción de su vulnerabilidad ante las amenazas naturales que puedan afectarlos, tratando de alcanzar las ventajas de la urbanización sostenible.

En la ciudad de Tulum se calcula, de acuerdo con el ultimo Censo de Población y Vivienda del INEGI 2020, que son cerca de 6 mil personas que habitan en suelo irregular. Estas áreas se localizan al sur de la ciudad y al norte (figura 47).

Con base en lo anterior, y después de haber identificado los polígonos correspondientes a asentamientos irregulares en la ciudad de Tulum, se procedió a obtener por medio de procesos geoespaciales, los indicadores siguientes: tipo de vivienda, servicios en la vivienda, material de la vivienda, uso de suelo y superficie de invasión.

Las dos áreas de asentamientos irregulares se muestran en la figura 59. En ésta se puede observar que se localizan al Norte y Sur del centro de población. Para fines de este análisis las identificaremos como Zona Irregular Norte (ZIN) y Zona Irregular Sur (ZIS).

La primera, ZIN, situada al Norte, tiene una extensión aproximada de 478,357.76 metros cuadrados (48 hectáreas aproximadamente), integrada por 71 manzanas urbanas con una población cercana a las 2, 872 personas (figura 59).

La segunda, ZIS, se localiza al Sur del centro de la ciudad (figura x), cuenta con 659, 921.59 m2, que equivale a 66 hectáreas, donde se contabiliza 5, 615 personas, de acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020a).

Figura 59. Asentamientos irregulares, ciudad de Tulum

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la Dirección General de Ordenamiento Ambiental y Cambio Climático, imágenes de satélite y trabajo de campo.

4.3.6.1. Tipo de vivienda

La existencia de asentamientos irregulares se identifican con ingresos bajos de la población y la precariedad de la vivienda, actualmente no existe un mosaico nacional sobre la localización de asentamientos irregulares y las características de todos los regímenes de propiedad del suelo, lo anterior limita la toma de decisiones (INSUS, 2020).

Al interior de la ciudad de Tulum los tipos de vivienda que se observa en los polígonos ZIN y ZIS son los siguientes:

Tabla 67. Material de construcción de la vivienda en asentamientos irregulares

Asentamientos Irregulares	Total de viviendas particulares	Viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas con piso de material diferente de tierra	Viviendas particulares habitadas con piso de tierra
ZIN	929	794	697	99
ZIS	1,714	1,332	1,299	374

Nota: ZIN: Zona Irregular Norte, ZIS: Zona Irregular Sur.
Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

4.3.6.2. Servicios en la vivienda

Las áreas legalmente urbanizadas cuentan con redes de infraestructura, equipamientos y servicios. A diferencia de los predios fraccionados o subdivididos, producto de una ocupación informal, irregular o ilegal de terrenos, donde los habitantes no ostentan derecho de tenencia de la tierra y suelen carecer de servicios urbanos e infraestructura.

No obstante, en las áreas de asentamientos irregulares de la ciudad de Tulum, cuentan con algunos servicios en la vivienda, se advierte más en la ZIS (tabla 69).

Tabla 68. Cobertura de servicios en viviendas particulares de ocupación informal, ciudad Tulum 2020

Asentamientos Irregulares	Total de viviendas particulares	Viviendas particulares habitadas	Viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica	Cobertura (%)
ZIN	929	794	808	87%
			Viviendas particulares habitadas que disponen de agua entubada	Cobertura (%)
			742	79.9%
			Viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje	Cobertura (%)
			744	80.1%
ZIS	1,714	1,332	Viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica	Cobertura (%)
			1,671	97.5%
			Viviendas particulares habitadas que disponen de agua entubada	Cobertura (%)
			1,540	89.8%
			Viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje	Cobertura (%)
			1,581	92.2%

Nota: ZIN: Zona Irregular Norte, ZIS: Zona Irregular Sur.
Fuente: INEGI (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México

4.3.6.3. Grado de Marginación

Para conducir la gestión del suelo en el país y en sus ciudades, se debe prever la demanda de suelo apto para todas las personas, priorizando a la población en situación de riesgo, rezago social y marginación, con la aplicación de políticas de desarrollo territorial.

Para este análisis se realizó una intersección geoespacial con las capas de información del grado de marginación urbana y las zonas de asentamientos irregulares de la ciudad de Tulum, el resultado se muestra en la figura siguiente.

Figura 60. Grado de Marginación Zonas Irregulares



Fuente: Elaboración propia con base en el CONAPO (2021b) e INEGI (2020a).

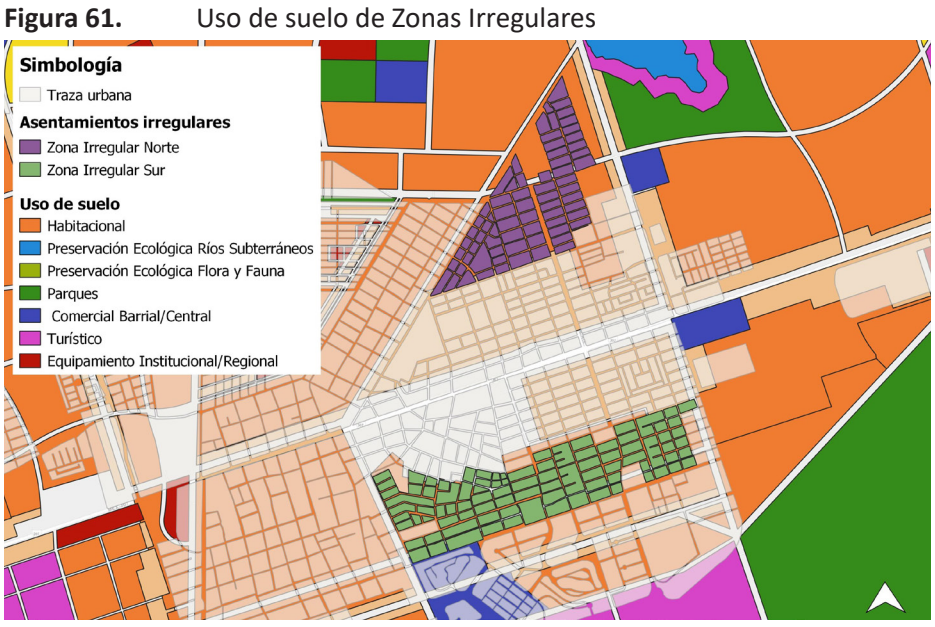
Como se puede observar, ambos asentamientos humanos irregulares posen un Grado de Marginación “Alto” y “Muy Alto”. La informalidad afecta la calidad de vida de la población. Los habitantes de estos asentamientos suelen tener condiciones precarias en la vivienda, falta de servicios adecuados de agua y drenaje, poca conectividad mediante los sistemas de transporte y carencia de equipamientos y servicios urbanos. Se deben tomar en cuenta análisis de riesgos en las acciones de planeación, regulación y previsión de suelo.

4.3.6.4. Uso de suelo

De acuerdo con el INSUS (2020), el sistema de financiamiento de la vivienda que prevaleció durante las últimas décadas tuvo un efecto regresivo sobre la mitad más pobre de la población, que se vio obligada a ocupar suelo irregular y a depender de procesos de autoconstrucción. Lo que implica que un alto porcentaje de la población tiene que vivir en condiciones de hacinamiento o asentándose de manera ilegal, informal o irregular.

En la ciudad de Tulum, los asentamientos de ocupación irregular se establecen sobre usos de suelo “Habitacional” (figura 61). Si bien, se localizan sobre suelo planificado para viviendas, la ocupación informal, irregular o ilegal de terrenos, se da a partir de que los habitantes no ostentan derecho de tenencia de la tierra y los servicios con los que cuentan son precarios.

Figura 61. Uso de suelo de Zonas Irregulares



Fuente: Elaboración propia con base a la Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

4.3.6.5. Superficie de invasión

De acuerdo con lo ya detallado, las dos zonas de asentamientos irregulares ocupan aproximadamente 114 hectáreas del total de la zona urbana de la ciudad de Tulum, esto equivale al 9.02% de las 1,263 hectáreas (12.63 km2) que comprenden la traza urbana total.

Fase II

Identificación de la susceptibilidad y los peligros ante fenómenos perturbadores de origen natural

5. FASE II. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LOS PELIGROS ANTE FENÓMENOS PERTURBADORES DE ORIGEN NATURAL

En materia de gestión de riesgos de desastres, sobre la base del Marco de Acción de Hyogo (MAH) (2005-2013) y Marco de Sendai (2015-2030), se ha reconocido a nivel internacional que las políticas públicas y acciones en materia de gestión integral de riesgo deben enfocarse en el aumento de la resiliencia de las comunidades y la reducción de las pérdidas y daños ante las amenazas naturales. El objetivo principal por alcanzar al 2030 es "La reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas que puedan ocasionar, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países" (UNISDR, 2015).

Evaluar el riesgo de desastres no significa simplemente estimar el daño físico esperado, damnificados o pérdidas económicas, sino también valorar factores sociales, así como la habilidad organizacional y la capacidad institucional. En materia de gestión de riesgos de desastres, la capacidad institucional se concibe como la capacidad administrativa y de gestión de un territorio, principalmente en la aplicación de políticas públicas para responder de manera eficiente y adecuada ante las amenazas.

Entre los cambios más importantes entre estas perspectivas se encuentra el marcado énfasis puesto en la "gestión del riesgo de desastres" en lugar de la "gestión de desastres". Por lo que los gobiernos deben adoptar medidas específicas en todos los sectores, desde lo local a lo global, basándose en las cuatro prioridades de acción del Marco de Sendai: 1) comprender el riesgo de desastres, 2) fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo, 3) invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia y aumentar la preparación para casos de desastres a fin de dar una respuesta eficaz y accionar una recuperación, rehabilitación y reconstrucción de mejor manera (UNISDR, 2015).

México desde 1986 ha establecido su propia gestión de riesgo, a partir de la tragedia sufrida por el temblor de 1985. Es así, que, por decreto presidencial, en 1986 se establece el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC). Posteriormente, en 1988, con el apoyo del gobierno de Japón, se crea el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), instancia concebida para mejorar los conocimientos existentes en prevención de desastres, contribuyendo en actividades de investigación y desarrollo, apoyado por el personal académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quedando como un órgano administrativo desconcentrado, subordinado a la Secretaría de Gobernación (SEGOB). Años más tarde, en el año 2000, para establecer las bases de coordinación entre los distintos órdenes de gobierno en materia de protección civil, se decreta la primera Ley General de Protección Civil (LGPC), la cual se reformo en junio de 2012, diciembre de 2017 y julio 2018. Lo anterior, creo un sólido marco institucional y de políticas públicas en el país, dando lugar a las funciones y responsabilidades de la evaluación de riesgos en México, cuyo enfoque involucra una mejor comprensión científica de las amenazas, que entre sus pretensiones se encuentran el desarrollo y actualización de los Atlas de Riesgo, como herramientas de planeación territorial (Hernández y López, 2020).

Los Atlas de Riesgo (AR) constituyen el marco de referencia para la elaboración de políticas y programas en todas las etapas de la "Gestión Integral del Riesgo"; asimismo, se establece que el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la institución técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil que tiene entre sus atribuciones la integración del Atlas Nacional de Riesgos (ANR) (DOF, 2014). De acuerdo con Guevara, et. al. (2006), los antecedentes del Atlas Nacional de Riesgo (ANR) se remontan a 1991, cuando la Secretaría de Gobernación publicó una primera versión del "Atlas Nacional de Riesgos" y posteriormente el "Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en la República Mexicana", elaborado por el CENAPRED en 2001. Asimismo, en 2004, CENAPRED publica la primera "Guía Metodológica para la elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel de Ciudad, Identificación y Zonificación" y la "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo".

La identificación de la susceptibilidad y los peligros ante fenómenos perturbadores es un proceso importante para la gestión integral del riesgo de desastres. Se deben identificar las causas y los efectos de los fenómenos perturbadores y las áreas y poblaciones que son vulnerables. Esto ayuda a los responsables de la toma de decisiones a tomar medidas de prevención y mitigación para reducir los riesgos asociados con estos fenómenos.

Para cumplir con ello, en 2016 en México, dentro del Plan Nacional 2013-2018, en el contexto del Programa Nacional de Protección Civil, se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Guía de Contenido Mínimo para la Elaboración del Atlas Nacional de Riesgos, donde se homogeneizan los criterios para la elaboración de los Atlas Estatales y Municipales (DOF, 2016).

Con base en lo anterior, un atlas de riesgos debe contener las amenazas establecidas en el artículo 2, fracciones XXII, XXIII, XXIV, XXV y XXVI de la Ley General de Protección Civil (LGPC, 2012), "así como aquéllos que no estén previstos en el ordenamiento señalado pero que se pueden evaluar las consecuencias cuando existan antecedentes documentados del peligro". Entre los fenómenos se encuentran los geológicos, hidrometeorológicos, químicos-tecnológicos, sanitario-ecológicos y socio-organizativos.

Todos los Atlas de Riesgos deberán integrar las secciones mínimas que establece el Reglamento de la Ley General de Protección Civil, en su artículo 112 (LGPC, 2012), los cuales consisten en un sistema de información geográfica, mapas de peligro, mapas de susceptibilidad para el caso de inestabilidad de laderas, u otro fenómeno cuando así aplique, inventario de bienes expuestos, inventario de vulnerabilidades, mapas de riesgo y escenarios de riesgos (DOF, 2016).

En esta sección se identifican los peligros para el municipio de Tulum, Quintana Roo, elaborando bases de datos que sustentan la cartografía correspondiente, se expone la metodología utilizada para ello.

5.1. Fenómenos geológicos

Los fenómenos geológicos son procesos naturales derivados de la interacción entre el núcleo, el manto y la corteza terrestre. A través de éstos se libera la energía acumulada en el centro de la Tierra. Entre los principales se encuentran las erupciones volcánicas, remociones en masa, terremotos y tsunamis.

De acuerdo con la Ley General de Protección Civil este tipo de fenómenos está ocasionado por un "agente perturbador que tiene como causa directa las acciones y movimientos de la corteza terrestre. A esta categoría pertenecen los sismos, las erupciones volcánicas, los tsunamis, la inestabilidad de laderas, los flujos, los caídos o derrumbes, los hundimientos, la subsidencia y los agrietamientos" Art. 2 fracc. XXIII

Los peligros geológicos de mayor impacto en México son, principalmente, los sismos, volcanes e inestabilidad de laderas (CENAPRED, 2021), los que producen las mayores catástrofes son los sismos. Son fenómenos impredecibles y cuyo impacto puede causar grandes niveles de daño. La actividad volcánica es otro peligro que representa una amenaza para la sociedad, ya que afecta a las personas, sus actividades y sus pertenencias. Sin embargo, Tulum no cuenta con algún volcán y los sismos que se han presentado son de magnitudes menores.

Otro peligro importante son los deslizamientos de laderas, que se producen, principalmente como consecuencia de otros fenómenos naturales como las lluvias, los sismos, las erupciones volcánicas, pero que pueden ser detectados a tiempo. Por tal motivo, y con para actuar de forma preventiva y minimizar el impacto de estos peligros, tanto de las personas como de bienes, es necesario conocer su comportamiento y su distribución en el territorio. Debido a la topografía casi plana del municipio y a las características de karsticidad del subsuelo, el peligro por deslizamiento de laderas en casi nulo, sin embargo, el peligro por hundimientos y subsidencias puede llegar a ser muy alto en algunas zonas.

5.1.1. Vulcanismo

El vulcanismo es un fenómeno geológico que involucra procesos fisicoquímicos en el interior de la Tierra que generan magma[1] y lo ubican en la corteza terrestre. La actividad volcánica puede ser influenciada por diversos factores como la composición y temperatura del magma, las condiciones de presión y temperatura en el interior de la Tierra, la presencia de agua, la tectónica de placas y la interacción del magma con los materiales encajantes.

La generación de magma puede originarse por diferentes mecanismos, entre los que destacan la fusión parcial de la corteza o el manto terrestre, la asimilación de rocas por parte del magma, la mezcla de magmas, entre otros. Posteriormente, el magma asciende hacia la superficie a través de las fisuras y fracturas de la corteza terrestre, y en algunos casos, alcanza la superficie a través de volcanes.

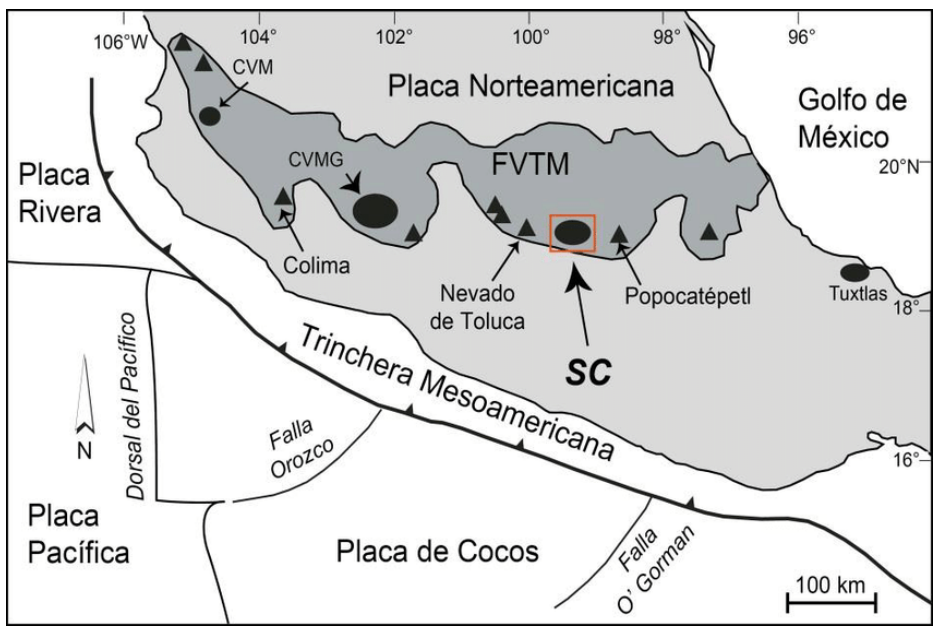
Una vez que el magma se encuentra en la corteza, comienzan procesos como la cristalización fraccionada, la diferenciación magmática y la contaminación, que dan lugar a la formación de diferentes tipos de rocas ígneas. Además, la actividad volcánica puede generar fenómenos como flujos piroclásticos, la formación de cráteres y calderas, la emisión de gases volcánicos y la formación de estructuras volcánicas complejas como los complejos volcánicos.

La actividad volcánica puede ser de distintos tipos y depende de las características de cada volcán. Algunos volcanes pueden presentar erupciones explosivas, mientras que otros pueden tener erupciones efusivas. Las erupciones explosivas son aquellas en las que se liberan grandes cantidades de material piroclástico, mientras que las erupciones efusivas son aquellas en las que el magma fluye más fácilmente y se produce una emisión de lava.

El vulcanismo puede tener diversos efectos en el medio ambiente y en las poblaciones cercanas. Las cenizas y los gases emitidos durante las erupciones pueden afectar la calidad del aire, mientras que las corrientes de lava pueden afectar la infraestructura y la agricultura. Además, algunos volcanes pueden generar otros fenómenos perturbadores como terremotos, tsunamis y deslizamientos.

En México, gran parte del vulcanismo está relacionado con la zona de subducción formada por las placas tectónicas de Rivera y Cocos en contacto con la gran placa de Norteamérica, y tiene su expresión volcánica en la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Esta Faja se caracteriza por estar formada por una diversidad de volcanes (estratovolcanes, conos de ceniza y volcanes escudo).

Figura 62. Faja Volcánica Transmexicana (FTVM)



Fuente: Smithsonian Institution, 2002

En el sureste de México, la presencia de la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre de Chiapas, han dado lugar a la formación de una amplia variedad de volcanes, entre los que destacan los estratovolcanes como el Popocatépetl, el Iztaccíhuatl y el Tacaná, así como los volcanes de escudo como el San Martín y el Jocotitlán. Además, también se encuentran conos volcánicos, domos y cráteres de explosión.

Cada año se registran alrededor de 50 erupciones volcánicas en alguno de los 600 volcanes activos en el mundo (CENAPRED, 2001). En México hay más de 2,000 volcanes, 15 se consideran activos; coincidentemente ha habido 15 erupciones importantes en los último 500 años, algunas de ellas han sido muy destructivas. De acuerdo con (UNDRO/UNESCO, 1985) cerca de 270,000 personas han muerto por efecto de las erupciones volcánicas desde el año 1700, sin embargo, el número total de víctimas no se puede estimar ya que las erupciones volcánicas ocasionan otros efectos negativos como las hambrunas o tsunamis en zonas costeras.

Otros desastres asociados a los volcanes pueden ser los lahares o los deslizamientos de ladera: que pueden ocurrir sin erupción o terremoto, ocasionados simplemente por unas lluvias anormales que inestabilizan los materiales volcánicos.

Actualmente se estima que el 10% de la población mundial vive cerca de algún volcán activo, es decir, más de 700 millones de personas podrían estar en riesgo por el peligro de los volcanes. De esos más de 700 millones el 90% viven en la región del Pacífico (Tilling, 2005).

De los volcanes más cercanos al municipio de Tulum se puede señalar la erupción del volcán El Chichón (Chichonal), ubicado en el Estado de Chiapas, el 4 de abril de 1982. Dicha erupción emitió una columna de 24 kilómetros de altura y 100 km de radio, provocando 2,000 muertes y 20,000 damnificados. Otra erupción reciente ocurrió el 3 de junio de 2018 en el volcán de Fuego, ubicado en Guatemala dejando 300 muertos y 1.7 millones de damnificados.

Para analizar la peligrosidad de los volcanes en el municipio se localizaron y caracterizaron los volcanes a nivel mundial, para ello se utilizó la Base de datos global de volcanes (Smithsonian Institution, 2002) publicada por la National Oceanic and Atmosferic Administration (NOAA) y con 1,604 registros de estructuras volcánicas. De estos registros se localizaron 26 volcanes activos a menos de 1,000 km del municipio.

Tabla 69. Volcanes activos a 1,000 km o menos de distancia la municipio.

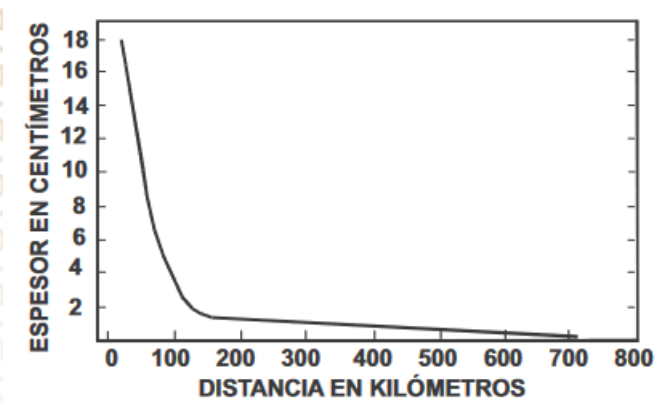
Nombre	País	Elevación (mts)	Tipo	Última erupción conocida	Distancia al municipio
Conchaguita		550	Estratovolcán	1800-1899	
Ilopango		450	Caldera	1800-1899	
Izalco		1950	Estratovolcán	1964 o posterior	
San Marcelino	El Salvador	2381	Estratovolcán	1900-1963	
San Miguel		2130	Estratovolcán	1964 o posterior	
San Salvador		1893	Estratovolcán	1900-1963	
Santa Ana		2381	Estratovolcán	1900-1963	
Acatenango		3976	Estratovolcán	1964 o posterior	
Almolonga		3173	Estratovolcán	1800-1899	
Atitlan		3535	Estratovolcán	1800-1899	
Fuego	Guatemala	3763	Estratovolcán	1964 o posterior	
Pacaya		2569	Volcán complejo	1964 o posterior	
Santa María		3745	Estratovolcán	1964 o posterior	
Tecuamburro		1845	Estratovolcán	Holoceno (A.C.)	
El Chichón		1150	Tuff cone	1964 o posterior	
Cofre de Perote	México	4282	Volcán de escudo	1-1499	
San Martín		1650	Volcán de escudo	1700-1799	
Tacaná		4064	Estratovolcán	1964 o posterior	
Apoyeque		518	Escudo piroclástico	Holoceno (A.C.)	
Cosiguina		872	Estratovolcán	1800-1899	
Masaya		594	Caldera	1964 o posterior	
Momotombo	Nicaragua	1270	Estratovolcán	1900-1963	
Negro, Cerro		728	Cinder cone	1964 o posterior	
Las Pilas		1088	Volcán complejo	1900-1963	
San Cristobal		1745	Estratovolcán	1964 o posterior	
Telica		1036	Estratovolcán	1964 o posterior	

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos por Fenómenos Geológicos" el CENAPRED (2004) para determinar la peligrosidad volcánica se debe trazar un círculo de 35 a 100 km de diámetro, que es la región dentro de la cual los lahares, cenizas, flujos piroclásticos, etc. pueden ser peligrosos (Martínez Bringas et al., 2004).

[1] Magma.- Materia en estado semifluido —resultado de la fusión de silicatos que contienen gases y minerales sólidos dispersos y otros compuestos que integran las rocas, encontrándose a temperaturas entre 700 y 1200°C— que forma la región situada debajo de la corteza terrestre. Cuando se encuentra en el interior de la tierra es nombrado concretamente magma y lava cuando es expulsada a la superficie.

Figura 63. Espesor de la capa de ceniza por distancia a un volcán



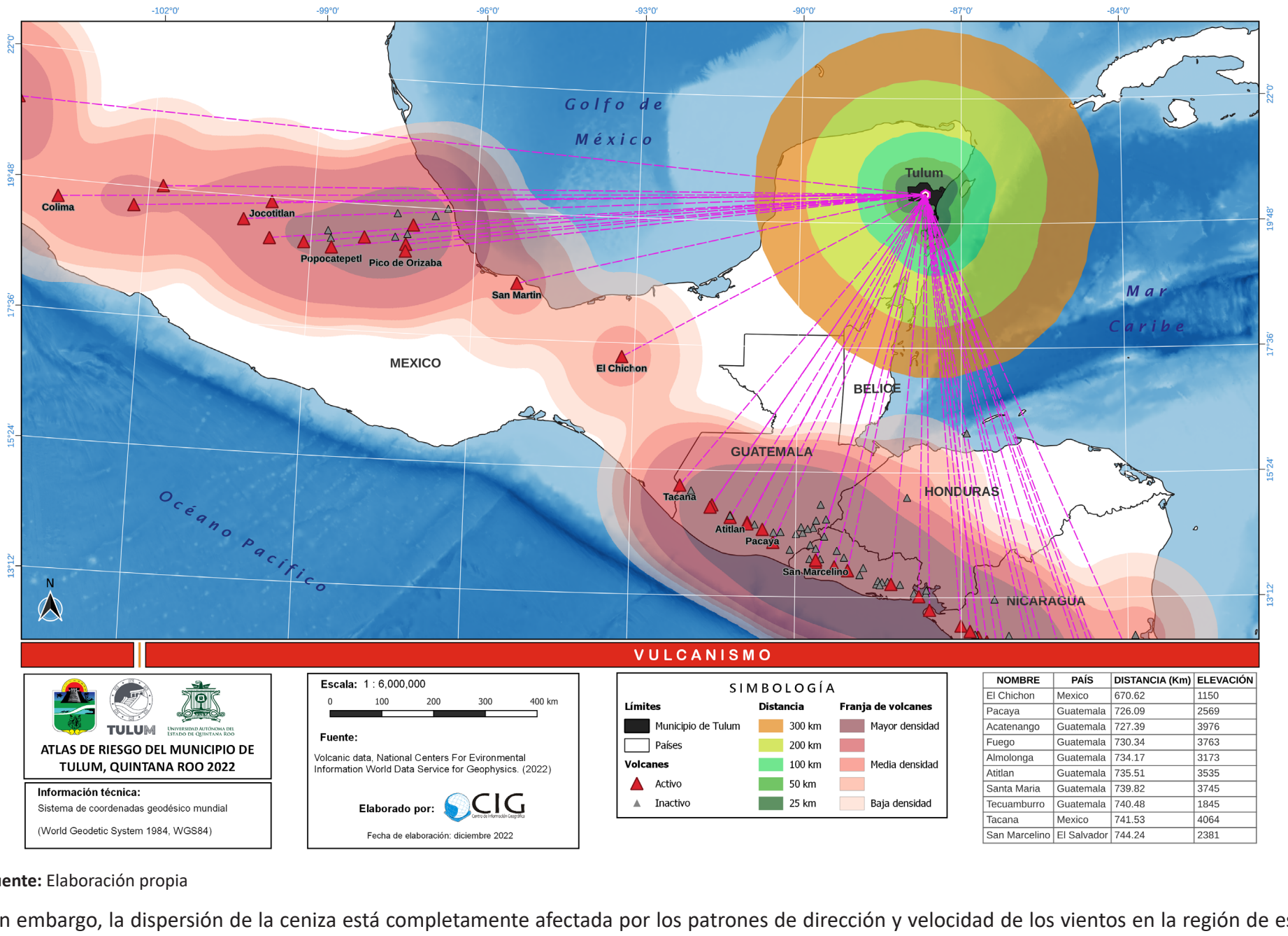
Fuente: Elaboración propia.

Para el municipio de Tulum, los volcanes más cercanos se encuentran a una distancia mayor respecto a los valores antes señalados, por lo que el peligro por una erupción volcánica es nulo.

Los volcanes activos más cercanos al municipio Tulum son el volcán Chichonal, el Tacaná, ambos en el estado de Chiapas a 667 y 734 kilómetros respectivamente; y el volcán de Fuego en Guatemala a 721 km al sur del municipio.

Debido a la lejanía de los volcanes activos al municipio el único peligro de tipo volcánico tendría que ser la caída de ceniza, que es un peligro de mayor alcance ya que las cenizas pueden alcanzar al estratosfera (11 km de altitud) y viajar a miles de kilómetros de su origen provocando daños en la salud (enfermedades respiratorias, trastornos gastroinstestinales, daños oculares, etc.), afectar cultivos, provocar accidentes viales y colapsar estructuras (las cenizas tienen una densidad de 700 km/m3 secas y 1,400 kg/m3 húmedas). De acuerdo con CENAPRED (2004) una capa de ceniza de 2 a 3 cm de espesor podría hacer colapsar un techo de materiales endebles o de mala calidad.

Figura 64. Distancia del municipio de Tulum a volcanes activos

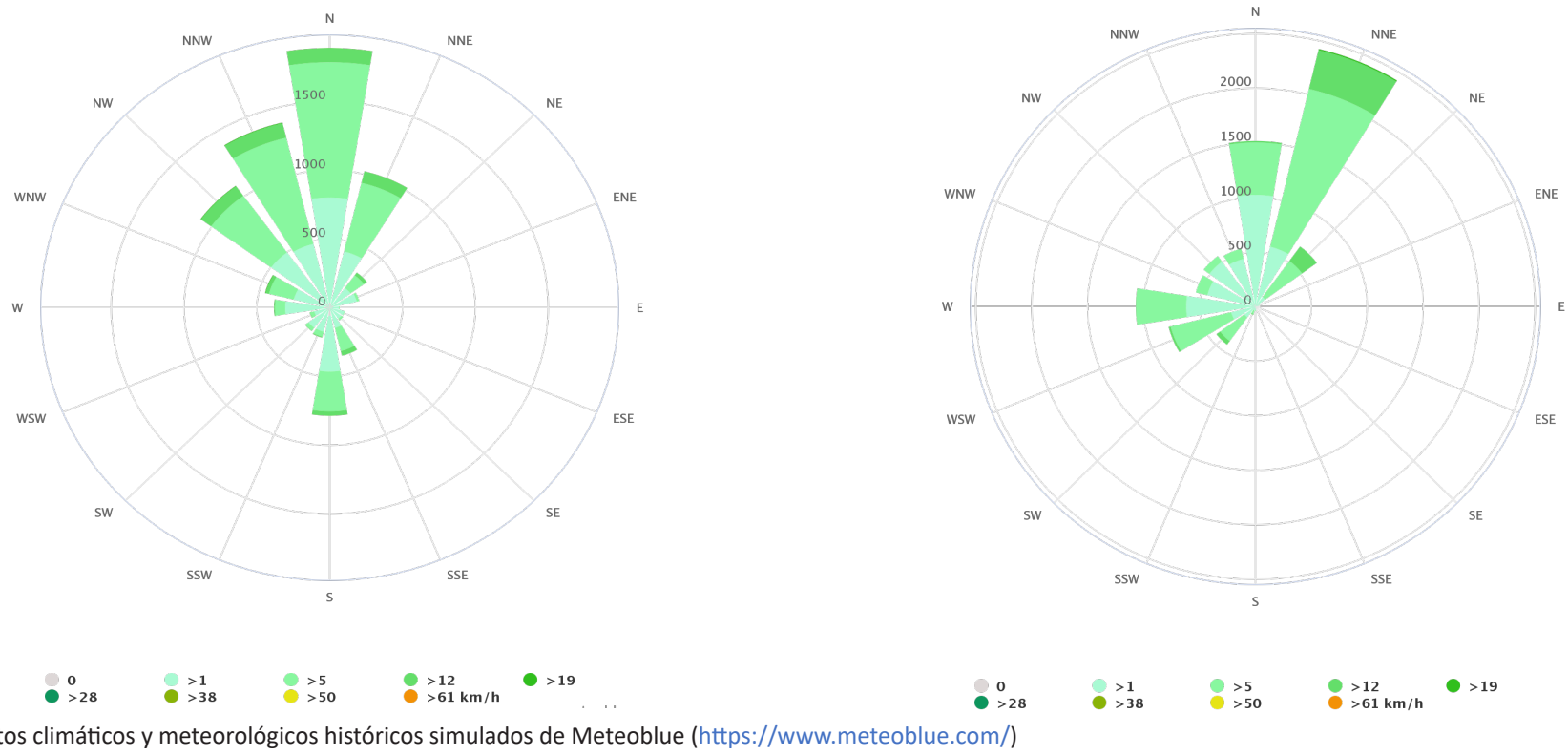


NOMBRE	PAÍS	DISTANCIA (Km)	ELEVACIÓN
El Chichon	Mexico	670.62	1150
Pacaya	Guatemala	726.09	2569
Acatenango	Guatemala	727.39	3976
Fuego	Guatemala	730.34	3763
Almolonga	Guatemala	734.17	3173
Atitlan	Guatemala	735.51	3535
Santa Maria	Guatemala	739.82	3745
Tecuamburro	Guatemala	740.48	1845
Tacana	Mexico	741.53	4064
San Marcelino	El Salvador	744.24	2381

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, la dispersión de la ceniza está completamente afectada por los patrones de dirección y velocidad de los vientos en la región de estudio. Como puede observarse en las siguientes ilustraciones, en caso de registrarse una nueva erupción las cenizas arrojadas por los volcanes cercanos viajarían en direcciones diferentes a la del municipio de Tulum.

Figura 65. Rosa de los vientos dominantes en el volcán Chichonal y en el Tacaná respectivamente.



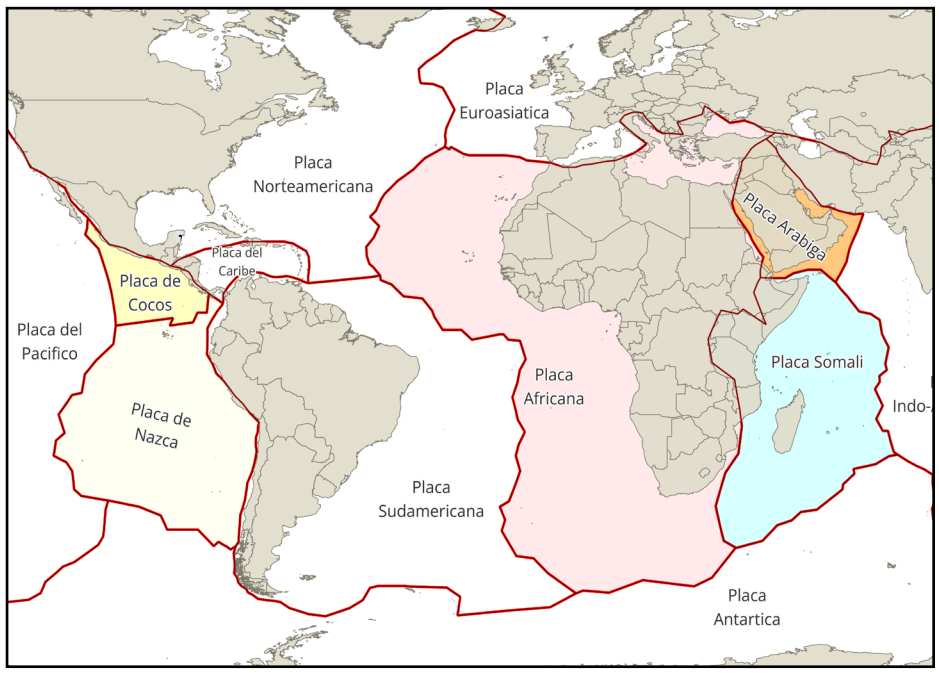
Fuente: Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados de Meteoblue (https://www.meteoblue.com/)

5.1.2. Sismos

Los sismos son movimientos violentos y repentinos de la Tierra que ocurren cuando se libera la energía acumulada en las capas más profundas del planeta. Esta energía se libera en forma de ondas sísmicas que se propagan por la Tierra y pueden ser detectadas y medidas por instrumentos especiales llamados sismómetros. Pueden ser causados por diversas fuerzas geológicas, como el movimiento de las placas tectónicas, la actividad volcánica, la expansión y contracción de la corteza terrestre, la actividad humana como la extracción de petróleo, la construcción de presas, la minería y la detonación de explosivos. Sin embargo, la mayoría de los sismos son causados por la actividad de las placas tectónicas.

Las placas tectónicas son enormes bloques de la corteza terrestre que flotan sobre el manto terrestre y se desplazan lentamente. Cuando dos placas chocan, se deslizan una contra la otra o se separan, se produce una gran cantidad de energía acumulada. Si esta energía no puede ser liberada gradualmente, puede acumularse hasta que la fuerza necesaria para liberarla sea mayor que la resistencia de la roca. En ese momento, se produce una ruptura y se libera una gran cantidad de energía en forma de ondas sísmicas.

Figura 66. Placas tectónicas del mundo



Fuente: Elaboración propia

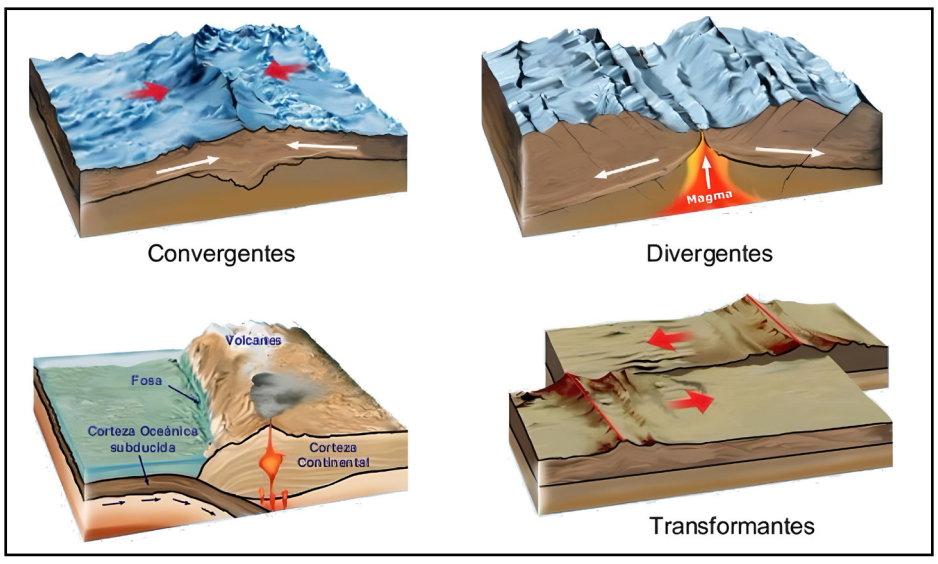
El movimiento de las placas tectónicas puede experimentarse de tres formas:

- **Divergente:** cuando las placas tectónicas se alejan entre sí, creando un espacio en el medio. Este tipo de movimiento ocurre generalmente en los límites de las placas oceánicas, donde se forma nueva corteza oceánica.

- **Convergente:** cuando las placas tectónicas chocan entre sí y una placa se sumerge debajo de la otra. Este tipo de movimiento ocurre generalmente en los límites de las placas continentales y oceánicas, donde se forma una zona de subducción.

- **Transformante:** cuando las placas tectónicas se mueven una junto a la otra, deslizándose horizontalmente en direcciones opuestas. Este tipo de movimiento ocurre generalmente en los límites de las placas, donde se produce una falla transformante.

Figura 67. Tipos de movimiento de las placas tectónicas

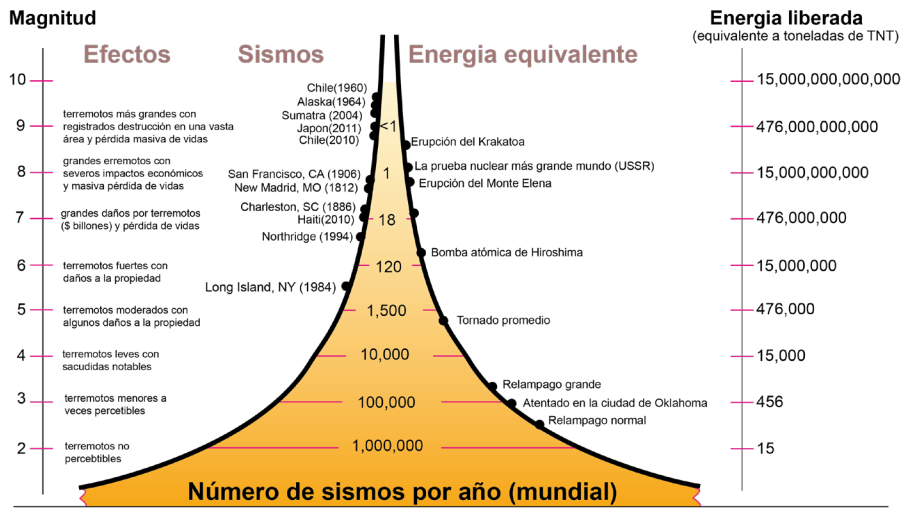


Fuente: https://eolapaz.com/los-movimientos-tectonicos/

Es importante destacar que estos tipos de movimientos pueden ocurrir en diferentes combinaciones y no todos los límites de las placas tectónicas tienen el mismo tipo de movimiento. Los sismos son causados por la liberación repentina de energía acumulada en el interior de la Tierra, generalmente debido al movimiento de las placas tectónicas. Cuando las placas se desplazan, generan ondas sísmicas que se propagan a través de la Tierra y causan la vibración y el movimiento del suelo en la superficie.

La medición de los sismos se realiza mediante sismógrafos, que son instrumentos que registran las vibraciones y los movimientos del suelo. Estos registros se utilizan para determinar la magnitud y la ubicación del terremoto, así como su duración y otras características. La información recopilada por los sismógrafos es fundamental para el estudio y la prevención de los sismos. La escala sismológica de magnitud de momento (Mʟ) es una escala logarítmica (corresponde a un incremento de raíz cuadrada de 1,000, o bien, de aproximadamente 32 veces la energía liberada) usada para medir y comparar terremotos. Es decir que, un sismo de magnitud 8 es 32 veces más grande que uno de magnitud 7, 1,000 veces más grande que uno de magnitud 6, 32,000 veces más grande que uno de magnitud 5, y así sucesivamente. (Choy & Boatwright, 1995). Está basada en la medición de la energía total que se libera en un sismo. Fue introducida en 1979 por Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori como la sucesora de la escala sismológica de Richter.

Figura 68. Escala sismológica de magnitud de momento (Mʟ)



Fuente: Elaboración propia

Una ventaja de la escala de magnitud de momento es que no se satura cerca de valores altos. Es decir, a diferencia de otras escalas, ésta no tiene un valor por encima del cual todos los terremotos más grandes reflejen magnitudes muy similares. Otra ventaja que posee esta escala es que coincide y continúa con los parámetros de la escala sismológica de Richter. Por estas razones, la escala de magnitud de momento es la más usada por sismólogos para medir y comparar terremotos de grandes proporciones.

Memoria de cálculo

México es un país que se encuentra ubicado en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico, donde se concentra la mayor parte de los terremotos del planeta (80% de la sismicidad mundial). En México está en el límite de varias placas tectónicas que interactúan entre sí, generando fricción, deformación y liberación de energía.

Las principales placas que afectan al país son la placa de Norteamérica, la placa del Pacífico, la placa de Cocos, la placa de Rivera y la placa del Caribe. La placa de Norteamérica se separa de la del Pacífico pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, provocando sismos en diferentes regiones del país, principalmente en la costa del pacífico.

La costa del Pacífico Mexicano se encuentra sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, una zona de alta actividad sísmica debido a la interacción de varias placas tectónicas. Esta región es conocida por su actividad sísmica, que ha sido documentada por los expertos geólogos y los servicios de monitoreo de terremotos en todo el mundo.

Los sismos en la región del Cinturón de Fuego del Pacífico son causados por la interacción de varias placas tectónicas, incluyendo la placa de

Cocos, la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica. Estas placas se están moviendo constantemente, lo que produce una gran cantidad de energía que se libera en forma de terremotos.

Recientemente, la costa del Pacífico de México ha experimentado varios sismos significativos. El 7 de septiembre de 2021, un terremoto de magnitud 7.1 sacudió la región de Acapulco, dejando a su paso importantes daños materiales y humanos. Este terremoto se produjo a una profundidad de 10 km y se sintió en una amplia zona del país. Aunque se produjeron réplicas, no hubo un tsunami importante.

En otras partes de la región del Cinturón de Fuego del Pacífico, también se han registrado sismos significativos en los últimos años. En septiembre de 2017, un terremoto de magnitud 8.1 sacudió el sur de México, causando daños generalizados y la pérdida de vidas humanas. En febrero de 2018, un terremoto de magnitud 7.2 sacudió la región de Oaxaca, causando daños significativos a las estructuras y la infraestructura.

En los últimos 250 años se han documentado al menos 319 grandes sismos en México, con magnitudes mayores a 6 y menores que 8.6. A continuación se presenta la lista de estos sismos:

Tabla 70. Sismos de magnitud mayor a 6 registrados desde 1900 a 2023

Mag	Lat	Long	Prof (kms)	Referencia de localización	Año
8.2	14.76	-94.10	45.9	140 km al SUROESTE de PIJIJIAPAN, CHIS	2017
8.2	19.57	-104.42	33	4 km al SURESTE de CASIMIRO CASTILLO, JAL	1932
8.1	18.42	-102.47	15	45 km al NOROESTE de LA MIRA, MICH	1985
8	18.99	-104.25	25	10 km al SURESTE de MANZANILLO, COL	1995
7.9	14.8	-91.3	50	93 km al ESTE de CD HIDALGO, CHIS	1942
7.8	17.11	-99.1	33	47 km al NORESTE de SAN MARCOS, GRO	1957
7.8	19.5	-103.5	33	14 km al SUROESTE de TUXPAN, JAL	1932
7.8	16.34	-96.87	40	30 km al OESTE de MIAHUATLAN, OAX	1931
7.7	18.22	-103.29	15	63 km al SUR de COALCOMAN, MICH	2022
7.7	16.5	-92.5	25	5 km al SUROESTE de TEOPISCA, CHIS	1902
7.6	18.6	-104.22	9	46 km al SUROESTE de CD DE ARMERIA, COL	2003
7.6	17.83	-101.68	17	25 km al NOROESTE de ZIHUATANEJO, GRO	1985
7.6	16.01	-96.59	23	32 km al NOROESTE de S PEDRO POCHUTLA, OAX	1978
7.6	18.41	-103.02	24	43 km al SURESTE de COALCOMAN, MICH	1973
7.6	18.85	-102.94	33	25 km al NORESTE de COALCOMAN, MICH	1941
7.6	16.33	-96.7	33	11 km al OESTE de MIAHUATLAN, OAX	1928
7.6	17.5	-102.5	33	59 km al SUROESTE de CD LAZARO CARD., MICH	1911
7.6	16.7	-99.2	33	23 km al SURESTE de SAN MARCOS, GRO	1907
7.6	15	-93	33	50 km al SUR de MAPASTEPEC, CHIS	1903
7.5	16.26	-98.46	18	46 km al SUR de OMETEPEC, GRO	2012
7.5	15.26	-89.20	13	319 km al ESTE de FRONTERA COMALAPA, CHIS	1976
7.5	15.67	-96.1	33	12 km al SURESTE de CRUCECITA, OAX	1928
7.5	16.3	-97.3	33	35 km al NORESTE de RIO GRANDE, OAX	1928
7.5	16.9	-100.7	50	36 km al SUR de TECPAN, GRO	1911
7.5	16.7	-99.2	33	23 km al SURESTE de SAN MARCOS, GRO	1908
7.5	14.9	-91.5	25	72 km al ESTE de CACAHOATAN, CHIS	1902
7.4	15.80	-96.13	22.8	4 km al NORTE de CRUCECITA, OAX	2020
7.4	16.06	-97.00	39	22 km al NORESTE de PUERTO ESCONDIDO, OAX	1999
7.4	17.75	-101.26	25	24 km al NORTE de PETATLAN, GRO	1979
7.4	16.18	-95.88	12	53 km al NORESTE de CRUCECITA, OAX	1965
7.4	17.6	-101.1	33	20 km al NORESTE de PETATLAN, GRO	1943
7.4	17.1	-98.07	33	46 km al SUROESTE de H TLAXIACO, OAX	1937
7.4	16.83	-97.61	33	49 km al SUR de H TLAXIACO, OAX	1928
7.4	15	-91	120	125 km al ESTE de CACAHOATAN, CHIS	1921
7.4	14	-89	80	348 km al ESTE de CD HIDALGO, CHIS	1915
7.4	20	-105	33	71 km al NO. de AUTLAN DE NAVARRO, JAL	1900
7.3	14.03	-92.32	17.1	74 km al SUR de CD HIDALGO, CHIS	2012
7.3	16.75	-98.67	21	29 km al NOROESTE de OMETEPEC, GRO	1995
7.3	13.35	-89.37	74	335 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1982
7.3	18.09	-102.06	21	18 km al NORESTE de LAS GUACAMAYAS, MICH	1981
7.3	18.25	-96.55	82	30 km al SUROESTE de TIERRA BLANCA, VER	1973
7.3	14.46	-92.68	44	62 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	1970
7.3	16.6	-97.8	16	39 km al NORESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	1968
7.3	18.45	-96.08	85	24 km al NORTE de TRES VALLES, VER	1937
7.3	14.75	-92.5	33	31 km al SUROESTE de TAPACHULA, CHIS	1935
7.2	16.22	-98.01	16	14 km al SURESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	2018
7.2	17.01	-101.46	18	61 km al SUROESTE de PETATLAN, GRO	2014
7.2	32.47	-115.37	10	23 km al SURESTE de MEXICALI, BC	2010
7.2	14.8	-92.69	34	44 km al SUROESTE de HUIXTLA, CHIS	1993
7.2	18.03	-100.77	55	38 km al SUROESTE de CD ALTAMIRANO, GRO	1964
7.2	14.3	-91.8	33	56 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1950
7.2	17.22	-98.12	33	47 km al OESTE de H TLAXIACO, OAX	1950
7.2	17	-92	150	14 km al NORESTE de OCOSINGO, CHIS	1914
7.2	16.8	-99.9	33	8 km al SUR de ACAPULCO, GRO	1909
7.1	16.76	-99.95	15	14 km al SUROESTE de ACAPULCO, GRO	2021
7.1	18.33	-98.67	51.2	8 km al NOROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE	2017
7.1	18.34	-102.58	40	43 km al NOROESTE de LA MIRA, MICH	1997
7.1	15.88	-97.98	15	52 km al SUR de PINOTEPA NACIONAL, OAX	1996
7.1	16.81	-93.47	160	12 km al NOROESTE de OCOZOCOAUTLA, CHIS	1995
7.1	18.17	-98.22	65	19 km al OESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE	1980
7.1	17.25	-99.58	33	34 km al SUR de CHILPANCINGO, GRO	1962
7.1	15	-92.5	33	16 km al SUR de HUIXTLA, CHIS	1944
7.1	32.7	-115.5	33	5 km al NOROESTE de MEXICALI, BC	1940
7.1	32	-114.75	33	46 km al SURESTE de GPE VICTORIA(KM.43), BC	1934
7.1	28	-112.5	10	77 km al NOROESTE de SANTA ROSALIA, BCS	1907
7.1	20	-110	33	320 km al SUR de CABO SAN LUCAS, BCS	1906
7.1	17	-113	33	727 km al SUROESTE de CABO SAN LUCAS, BCS	1905
7.1	29	-114	33	115 km al NORTE de GUERRERO NEGRO, BCS	1902
7	17.99	-102.66	16	35 km al OESTE de LA MIRA, MICH	2000
7	18.13	-97.54	63	29 km al SUROESTE de S GABRIEL CHILAC, PUE	1999
7	18.36	-103.05	22	48 km al SUR de COALCOMAN, MICH	1986
7	14.03	-91.96	35	75 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1983
7	16.52	-98.34	19	20 km al SURESTE de OMETEPEC, GRO	1982
7	17.12	-99.57	33	41 km al NOROESTE de SAN MARCOS, GRO	1962
7	28.5	-113	33	120 km al NORESTE de GUERRERO NEGRO, BCS	1954
7	17	-94.5	100	59 km al ESTE de MATIAS ROMERO, OAX	1951
7	19	-107	60	257 km al SUROESTE de PUERTO VALLARTA, JAL	1950
7	17	-98	80	45 km al SUROESTE de H TLAXIACO, OAX	1948
7	19	-105.31	33	83 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	1934
7	18	-107	33	291 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	1925
7	15.5	-92.5	33	31 km al NOROESTE de MOTOZINTLA, CHIS	1925
7	17.5	-95	150	42 km al SUR de SAYULA DE ALEMAN, VER	1916
7	32	-115	10	33 km al SURESTE de GPE VICTORIA(KM.43), BC	1915
7	15.5	-93	33	13 km al NOROESTE de MAPASTEPEC, CHIS	1912
7	17	-101	33	46 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	1908
7	17.62	-99.72	33	21 km al OESTE de ZUMPANGO DEL RIO, GRO	1902
7	26	-110	33	83 km al OESTE de AHOME, SIN	1901
6.9	18.01	-103.18	12	84 km al SUR de COALCOMAN, MICH	2022
6.9	14.73	-92.32	107.1	19 km al NOROESTE de CD HIDALGO, CHIS	2017
6.9	14.65	-92.56	56.7	43 km al SUROESTE de TAPACHULA, CHIS	2014
6.9	18.96	-107.15	15	272 km al SUROESTE de PUERTO VALLARTA, JAL	1997
6.9	16.42	-98.25	6	23 km al NO. de PINOTEPA NACIONAL, OAX	1982
6.9	17.01	-94.61	115	49 km al NORESTE de MATIAS ROMERO, OAX	1979
6.9	17	-94.5	150	59 km al ESTE de MATIAS ROMERO, OAX	1960
6.9	15.5	-92.5	200	31 km al NOROESTE de MOTOZINTLA, CHIS	1955
6.9	17	-98	80	45 km al SUROESTE de H TLAXIACO, OAX	1948
6.9	22	-106.5	33	116 km al SUROESTE de TECUALA, NAY	1948
6.9	17	-94.5	130	59 km al ESTE de MATIAS ROMERO, OAX	1946
6.9	17.78	-99.17	100	20 km al NORTE de CHILAPA DE ALVAREZ, GRO	1937
6.9	18.75	-103.5	33	36 km al OESTE de COALCOMAN, MICH	1935
6.9	17.5	-101	33	29 km al ESTE de PETATLAN, GRO	1933
6.9	18.74	-104.68	33	52 km al SUROESTE de MANZANILLO, COL	1932
6.9	18.87	-103.93	33	7 km al SUROESTE de TECOMAN, COL	1932
6.9	14.5	-91.75	33	48 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1919
6.9	15	-97	33	96 km al SUR de PUERTO ESCONDIDO, OAX	1917
6.9	19.93	-99.83	33	15 km al NORESTE de ATLACOMULCO, MEX	1912
6.9	16.77	-95.9	80	65 km al SURESTE de TLACOLULA, OAX	1910
6.9	16.62	-99.45	33	20 km al SUROESTE de SAN MARCOS, GRO	1909
6.9	17	-101.2	33	60 km al SUR de PETATLAN, GRO	1909
6.9	18	-102	33	23 km al ESTE de LAS GUACAMAYAS, MICH	1908
6.9	25	-110	33	100 km al NORESTE de LA PAZ, BCS	1901
6.9	20	-105	33	71 km al NO. de AUTLAN DE NAVARRO, JAL	1900
6.8	28.83	-113.16	5	130 km al NORESTE de GUERRERO NEGRO, BCS	2012
6.8	13.36	-91.64	17	156 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	2003
6.8	15.98	-92.43	160	42 km al SURESTE de VENUSTIANO CARR, CHIS	1994
6.8	16.80	-99.28	23	12 km al ESTE de SAN MARCOS, GRO	1989
6.8	16.17	-95.21	50	2 km al SUROESTE de SALINA CRUZ, OAX	1983
6.8	13.86	-90.86	64	167 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1979
6.8	13.78	-90.75	65	180 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1979
6.8	17.72	-97.15	80	28 km al SURESTE de TEPELMEME, OAX	1959
6.8	16.9	-98.7	33	39 km al NOROESTE de OMETEPEC, GRO	1951
6.8	27	-111	33	102 km al SUR de H GUAYMAS, SON	1945
6.8	17	-100	33	9 km al ESTE de COYUCA DE BENITEZ, GRO	1934
6.8	19	-104	33	8 km al NOROESTE de CD DE ARMERIA, COL	1932
6.8	27	-111	33	102 km al SUR de H GUAYMAS, SON	1918
6.8	18	-100	33	43 km al SUROESTE de TELOLOAPAN, GRO	1916
6.7	17.22	-94.32	171	80 km al SUROESTE de LAS CHOAPAS, VER	2011
6.7	15.43	-93.55	76	46 km al SUROESTE de PIJIJIAPAN, CHIS	2002
6.7	13.73	-91.93	16	108 km al SUR de CD HIDALGO, CHIS	1998
6.7	15.86	-98.26	15	58 km al SUROESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	1997
6.7	14.64	-92.80	47	65 km al SUROESTE de TAPACHULA, CHIS	1993
6.7	14.28	-92.07	45	45 km al SUR de CD HIDALGO, CHIS	1982
6.7	25.12	-109.55	15	93 km al SUROESTE de LOS MOCHIS, SIN	1969
6.7	17.51	-100.26	62	38 km al NORESTE de ATOYAC DE ALVAREZ, GRO	1968
6.7	15.52	-98.25	33	93 km al SUR de PINOTEPA NACIONAL, OAX	1957
6.7	31.9	-115.8	33	75 km al ESTE de RODOLFO SANCHEZ T(MRO), BC	1956
6.7	14.1	-91.4	96	103 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1953
6.7	16.4	-98.85	33	57 km al SUROESTE de OMETEPEC, GRO	1953
6.7	17	-115	33	841 km al SUROESTE de CABO SAN LUCAS, BCS	1945
6.7	15	-91.25	200	98 km al ESTE de CACAHOATAN, CHIS	1945
6.7	14.25	-91.5	80	85 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1943
6.7	15	-91.5	110	71 km al ESTE de CACAHOATAN, CHIS	1943
6.7	19	-101	100	43 km al NORTE de HUETAMO, MICH	1942
6.7	17.25	-94.25	90	75 km al SUR de LAS CHOAPAS, VER	1942
6.7	14.25	-91.5	90	85 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1940
6.7	29.5	-113.5	33	179 km al NORESTE de GUERRERO NEGRO, BCS	1939
6.7	14.5	-91.5	33	73 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1939
6.7	29	-113	33	149 km al OESTE de M ALEMAN(LA DOCE), SON	1932
6.7	26.5	-110	33	51 km al SUROESTE de HUATABAMPO, SON	1932
6.7	19	-107	33	257 km al SUROESTE de PUERTO VALLARTA, JAL	1931

Mag	Lat	Long	Prof (kms)	Referencia de localización	Año
6.7	17.69	-96.44	115	55 km al SUROESTE de TUXTEPEC, OAX	1928
6.7	19	-102	100	10 km al SURESTE de NUEVA ITALIA, MICH	1925
6.7	24	-108.5	33	117 km al SUROESTE de NAVOLATO, SIN	1922
6.7	19	-97	110	9 km al SURESTE de COSCOMATEPEC, VER	1920
6.7	17	-96	100	51 km al ESTE de TLACOLULA, OAX	1911
6.6	10.27	-103.72	10	837 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	2016
6.6	25.04	-109.53	8.2	100 km al SUROESTE de LOS MOCHIS, SIN	2015
6.6	15.76	-93.70	91.4	37 km al SUR de TONALA, CHIS	2015
6.6	14.05	-92.86	23	103 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	2008
6.6	28.38	-112.51	15	113 km al SUROESTE de M ALEMAN, SON	2006
6.6	14.37	-91.93	55	42 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1998
6.6	17.5	-101.12	22	17 km al ESTE de PETATLAN, GRO	1996
6.6	17.98	-101.52	53	37 km al NORTE de ZIHUATANEJO, GRO	1994
6.6	16.77	-98.77	30	40 km al OESTE de OMETEPEC, GRO	1993
6.6	26.81	-110.99	12	95 km al NORESTE de LORETO, BCS	1988
6.6	13.91	-90.56	74	192 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1988
6.6	17.40	-100.90	23	34 km al NOROESTE de TECPAN, GRO	1979
6.6	17.04	-99.75	44	24 km al NORESTE de ACAPULCO, GRO	1978
6.6	18.7	-106.76	10	238 km al OESTE de CIHUATLAN, JAL	1972
6.6	15.52	-99.49	21	141 km al SUR de SAN MARCOS, GRO	1970
6.6	23.11	-107.99	10	144 km al SUROESTE de LA CRUZ, SIN	1969
6.6	15.23	-94.78	23	114 km al SURESTE de SALINA CRUZ, OAX	1968
6.6	13.5	-92.66	25	141 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	1961
6.6	25	-110	33	100 km al NORESTE de LA PAZ, BCS	1955
6.6	14	-91	60	145 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1955
6.6	17.73	-106	33	225 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	1950
6.6	17.5	-100.5	33	33 km al NORTE de ATOYAC DE ALVAREZ, GRO	1950
6.6	19.5	-105	33	54 km al NOROESTE de CIHUATLAN, JAL	1933
6.6	18.7	-103.3	33	17 km al SUROESTE de COALCOMAN, MICH	1918
6.6	16.53	-99.72	33	42 km al SURESTE de ACAPULCO, GRO	1909
6.6	20	-110	33	320 km al SUR de CABO SAN LUCAS, BCS	1905
6.5	14.58	-92.48	76.2	37 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	2019
6.5	18.82	-106.98	10	258 km al OESTE de CIHUATLAN, JAL	2016
6.5	16.99	-100.92	10	40 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	2014
6.5	17.84	-99.96	54	50 km al NOROESTE de ZUMPANGO DEL RIO, GRO	2011
6.5	24.65	-109.41	8	107 km al NORESTE de LA PAZ, BCS	2010
6.5	28.85	-112.74	10	123 km al OESTE de M ALEMAN(LA DOCE), SON	2009
6.5	26.51	-110.04	12	53 km al SUROESTE de HUATABAMPO, SON	2003
6.5	16.77	-101.12	22	72 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	2002
6.5	18.64	-105.12	12	88 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	2001
6.5	12.17	-88.37	27	494 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1995
6.5	26.16	-110.35	10	101 km al ESTE de LORETO, BCS	1995
6.5	18.02	-105.67	27	179 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	1989
6.5	33.08	-115.98	10	63 km al NOROESTE de SANTA ISABEL, BC	1987
6.5	14.31	-91.66	33	67 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1986
6.5	17.79	-102.01	21	28 km al SE de CD LAZARO CARDENAS, MICH	1981
6.5	15.88	-88.51	24	291 km al SUR de CHETUMAL, QR	1980
6.5	32.78	-115.66	14	19 km al NOROESTE de SANTA ISABEL, BC	1979
6.5	12.76	-87.29	49	567 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1978
6.5	17.41	-100.68	57	21 km al NOROESTE de TECPAN, GRO	1976
6.5	29.30	-113.47	5	160 km al NORESTE de GUERRERO NEGRO, BCS	1975
6.5	15.54	-95.04	14	73 km al SUR de SALINA CRUZ, OAX	1972
6.5	26.88	-110.8	14	92 km al SUROESTE de PUEBLO YAQUI, SON	1971
6.5	14.61	-93.26	22	100 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS	1970
6.5	25.25	-109.24	15	65 km al SUROESTE de LOS MOCHIS, SIN	1969
6.5	17.25	-100.07	65	27 km al NORTE de COYUCA DE BENITEZ, GRO	1965
6.5	26.32	-110.28	10	85 km al SUROESTE de HUATABAMPO, SON	1964
6.5	29.68	-113.74	7	182 km al SUR de PUERTO PEÃ‘ASCO, SON	1963
6.5	17.75	-95.25	100	31 km al SURESTE de J RODRIGUEZ CLARA, VER	1948
6.5	16.5	-94	100	31 km al NOROESTE de ARRIAGA , CHIS	1946
6.5	18.32	-97.65	95	31 km al SUROESTE de TEHUACAN, PUE	1945
6.5	17	-101	33	46 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	1944
6.5	15.68	-97.8	33	54 km al SUROESTE de RIO GRANDE, OAX	1937
6.5	18.26	-97.99	84	9 km al NORESTE de ACATLAN DE OSORIO, PUE	1928
6.5	18.2	-103.3	33	65 km al SUR de COALCOMAN, MICH	1921
6.5	17.8	-97.6	80	19 km al ESTE de H HUAJUAPAN DE LEON, OAX	1911
6.5	16.7	-99.2	33	23 km al SURESTE de SAN MARCOS, GRO	1910
6.4	13.78	-93.34	9.4	162 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	2019
6.4	17.70	-95.64	117.2	38 km al SUROESTE de ISLA, VER	2014
6.4	17.92	-103.07	20	79 km al OESTE de LA MIRA, MICH	2012
6.4	31.19	-119.42	15.9	257 km al SUROESTE de PLAYAS DE ROSARITO, BC	2012
6.4	17.64	-105.61	16	208 km al SUROESTE de MANZANILLO, COL	2008
6.4	16.22	-98.16	10	18 km al SUROESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	2004
6.4	15.41	-93.64	36	55 km al SUROESTE de PIJIJIAPAN, CHIS	2001
6.4	13.59	-92.14	50	120 km al SUR de CD HIDALGO, CHIS	1999
6.4	15.69	-96.37	33	12 km al SURESTE de S PEDRO POCHUTLA, OAX	1998
6.4	13.78	-90.83	15	174 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1998
6.4	14.78	-95.01	13	156 km al SUR de SALINA CRUZ, OAX	1993
6.4	32.22	-114.99	5	13 km al SURESTE de GPE VICTORIA(KM.43), BC	1980
6.4	18.26	-94.43	21	12 km al NORTE de ALLENDE, VER	1959
6.4	19.27	-96.97	10	13 km al NORTE de HUATUSCO, VER	1920
6.3	28.17	-112.36	10	92 km al NORTE de SANTA ROSALIA, BCS	2022
6.3	26.67	-111.08	16.1	77 km al NORESTE de LORETO, BCS	2018
6.3	26.09	-110.46	14.1	89 km al ESTE de LORETO, BCS	2013
6.3	24.91	-109.97	2	92 km al NORESTE de LA PAZ, BCS	2007
6.3	17.34	-101.42	6	27 km al SUROESTE de PETATLAN, GRO	2004
6.3	15.1	-93.03	108	41 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS	2001
6.3	24.62	-110.26	10	53 km al NORTE de LA PAZ, BCS	1995
6.3	13.99	-93.43	5	157 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	1993
6.3	13.58	-91.69	33	131 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1979
6.3	27.23	-111.24	33	83 km al SUROESTE de H GUAYMAS, SON	1974
6.2	13.84	-91.57	62	112 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	2022
6.2	30.68	-116.37	10	37 km al OESTE de VICENTE GUERRERO, BC	2022
6.2	22.35	-108.01	5	191 km al SUROESTE de MAZATLAN, SIN	2020
6.2	18.64	-106.96	16	260 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	2015
6.2	19.00	-107.33	10	283 km al SUROESTE de PUERTO VALLARTA, JAL	2014
6.2	13.81	-92.50	6.6	103 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	2012
6.2	16.32	-94.02	94	16 km al NOROESTE de ARRIAGA , CHIS	2007
6.2	17.72	-105.7	10	206 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	2003
6.2	23.22	-108.73	35	102 km al ESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS	2002
6.2	18.51	-104.71	10	73 km al SUROESTE de MANZANILLO, COL	2001
6.2	17.99	-101.72	54	42 km al NOROESTE de ZIHUATANEJO, GRO	1999
6.2	15.82	-94.07	16	45 km al SUROESTE de TONALA, CHIS	1998
6.2	18.96	-105.63	16	116 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	1995
6.2	18.54	-105.77	10	149 km al SO de CIHUATLAN, JAL	1990
6.2	28.33	-112.08	9	82 km al SO de M ALEMAN(LA DOCE), SON	1984
6.2	20.36	-115.76	9	666 km al SUROESTE de CD CONSTITUCION, BCS	1984
6.2	19.98	-109.45	9	326 km al SUR de CABO SAN LUCAS, BCS	1983
6.1	16.50	-95.15	10	9 km al SUROESTE de CD IXTEPEC, OAX	2017
6.1	13.25	-92.46	12	161 km al SUR de CD HIDALGO, CHIS	2016
6.1	18.28	-105.31	8.7	131 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	2016
6.1	17.04	-100.89	10	35 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	2014
6.1	23.70	-108.76	10	120 km al NORESTE de SAN JOSE DEL CABO, BCS	2014
6.1	13.68	-91.44	32	135 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	2014
6.1	14.38	-90.79	197	150 km al ESTE de CD HIDALGO, CHIS	2013
6.1	14.43	-93.23	12	113 km al SUROESTE de HUIXTLA, CHIS	2012
6.1	18.18	-100.53	45.4	24 km al SURESTE de CD ALTAMIRANO, GRO	2012
6.1	18.44	-107.27	14	299 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	2010
6.1	15.34	-93.24	66	38 km al SUR de PIJIJIAPAN, CHIS	2001
6.1	16.94	-100.14	4	9 km al SUROESTE de COYUCA DE BENITEZ, GRO	2001
6.1	18.02	-101.68	82	44 km al NOROESTE de ZIHUATANEJO, GRO	1999
6.1	14.67	-89.74	152	260 km al ESTE de CD HIDALGO, CHIS	1997
6.1	13.99	-90.85	81	160 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1997
6.1	19.04	-103.7	11	21 km al SURESTE de COQUIMATLAN, COL	1995
6.1	14.83	-97.31	19	117 km al SUR de PUERTO ESCONDIDO, OAX	1994
6.1	23.99	-108.49	10	117 km al SUROESTE de NAVOLATO, SIN	1991
6.1	24.93	-109.1	20	94 km al SUROESTE de G LEYVA SOLANO, SIN	1990
6.1	15.93	-100.88	25	145 km al SUR de TECPAN, GRO	1982
6.1	19.09	-107.33	33	277 km al SUROESTE de PUERTO VALLARTA, JAL	1980
6.1	14.13	-91.82	39	70 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1974
6	17.13	-100.64	14.1	10 km al SUROESTE de TECPAN, GRO	2022
6	18.72	-107.16	10	279 km al OESTE de CIHUATLAN, JAL	2021
6	16.25	-94.62	80.8	33 km al SURESTE de UNION HIDALGO, OAX	2020
6	16.25	-97.78	10.2	31 km al SURESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	2018
6	14.54	-93.21	10.4	104 km al SUROESTE de HUIXTLA, CHIS	2016
6	14.29	-93.39	20	137 km al SUROESTE de HUIXTLA, CHIS	2016
6	16.32	-97.88	7.4	19 km al ESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	2016
6	16.75	-99.58	5	21 km al OESTE de SAN MARCOS, GRO	2013
6	14.34	-92.26	69.7	39 km al SUROESTE de CD HIDALGO, CHIS	2013
6	14.70	-93.29	16.1	92 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS	2012
6	16.29	-98.54	12	45 km al SUROESTE de OMETEPEC, GRO	2012
6	28.80	-113.41	15	112 km al NORESTE de GUERRERO NEGRO, BCS	2012
6	24.78	-110.23	11.2	71 km al NORTE de LA PAZ, BCS	2012
6	17.69	-95.21	135	34 km al SUROESTE de SAYULA DE ALEMAN, VER	2011
6	19.73	-109.3	16	355 km al SUR de CABO SAN LUCAS, BCS	2011
6	19.74	-109.31	15	354 km al SUR de CABO SAN LUCAS, BCS	2011
6	16.24	-97.99	4	13 km al SURESTE de PINOTEPA NACIONAL, OAX	2010
6	13.29	-90.24	58	257 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	2004
6	16.66	-101.89	12	115 km al SUROESTE de ZIHUATANEJO, GRO	2002
6	18.09	-98.97	48	45 km al SUROESTE de CHIAUTLA DE TAPIA, PUE	2000
6	14.27	-94.09	7	183 km al SUROESTE de MAPASTEPEC, CHIS	2000
6	14.54	-91.61	136	60 km al ESTE de CD HIDALGO, CHIS	1999
6	18.41	-101.81	59	61 km al NORESTE de LAS GUACAMAYAS, MICH	1997
6	15.7	-99.04	16	127 km al SURESTE de SAN MARCOS, GRO	1997
6	15.49	-97.55	15	59 km al SUR de RIO GRANDE, OAX	1996
6	18.73	-105.74	21	136 km al SUROESTE de CIHUATLAN, JAL	1995
6	16.47	-98.72	15	41 km al SUROESTE de OMETEPEC, GRO	1993
6	17.39	-97.26	68	46 km al NORESTE de H TLAXIACO, OAX	1987
6	16.08	-94.2	90	36 km al SUROESTE de ARRIAGA , CHIS	1986
6	15.84	-99.03	33	112 km al SURESTE de SAN MARCOS, GRO	1984
6	16.44	-100.29	33	63 km al SUROESTE de ACAPULCO, GRO	1982
6	13.18	-87.59	4	520 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1982
6	13.24	-88.91	76	384 km al SURESTE de CD HIDALGO, CHIS	1982
6	18.73	-107.03	33	266 km al OESTE de CIHUATLAN, JAL	1981
6	17	-101.99	33	85 km al SUROESTE de ZIHUATANEJO, GRO	1979
6	17.58	-100.83	36	45 km al NOROESTE de TECPAN, GRO	1979
6	15.67	-92.93	100	26 km al NORTE de MAPASTEPEC, CHIS	1979
6	16.34	-98.87	11	62 km al SUROESTE de OMETEPEC, GRO	1975
6	15.84	-93.48	100	34 km al NOROESTE de PIJIJIAPAN, CHIS	1974

Fuente: Servicio Sismológico Nacional (2023)

Con base en las estadísticas e información de los catálogos sísmicos históricos, en el territorio nacional se espera al menos un sismo de magnitud mayor o igual a 7.5 cada 10 años. En promedio, se detectan 150 sismos de magnitudes mayores de o iguales a 4.5 cada año (CENAPRED, 2022)

En la región entre Zihuatanejo y Acapulco se encuentra el área conocida como la Brecha Sísmica de Guerrero, tiene un segmento de aproximadamente 200 kilómetros en los límites de las placas de Cocos y América del Norte. No donde hace más de 100 años (el último terremoto registrado fue en 1911) que no sucede un sismo mayor de 7.5, y si bien no se sabe cuándo pueda ocurrir, sólo por su extensión de área existe la posibilidad de uno de magnitud 8.2 (CENAPRED, 2022).

Resultado análisis

Aunque existen regiones bien definidas en el mundo: es practicamente imposible predecir la ocurrencia de un sismo a través de un procedimiento confiable que arroje el momento de su ocurrencia ni de su magnitud. En México, como ya se señalo, la región sísmica más cercana al municipio de Tulum es la costa de los estados de Oaxaca y Guerrero, particularmente la zona de subducción de la Placa de Cocos con la norteamericana.

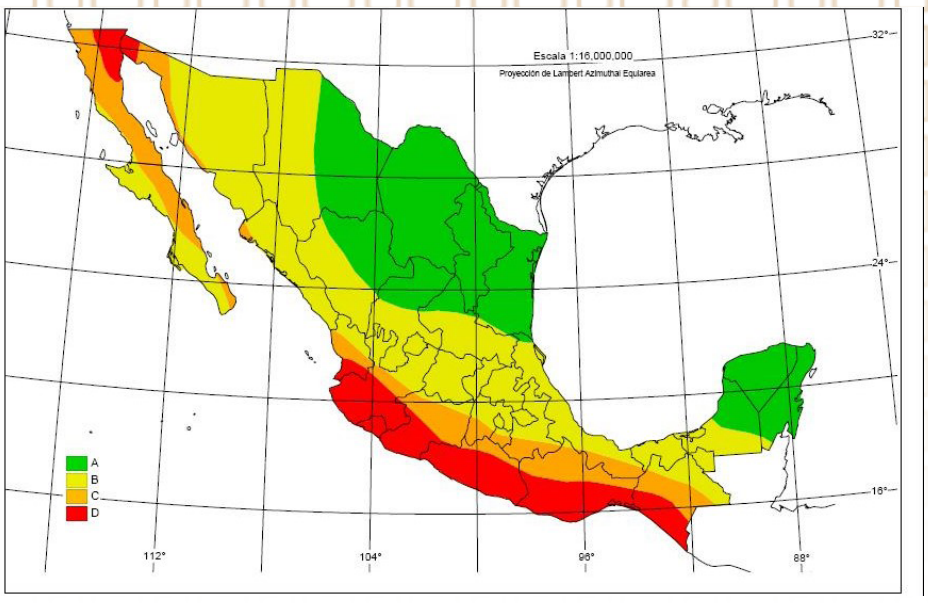
Por otra parte, cualquier catálogo sísmico mundial o regional, que cubra un periodo de varios años (50 ó 100 años), nos mostrará que el promedio de temblores por cualquier periodo definido es muy similar (Gutiérrez Martínez, 2006). Es por ello que en México, a través del programa Peligro Sísmico en México (1996), se han elaborado mapas de aceleracón máxima del terreno para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años a nivel nacional.

Se sabe también que aquellas aceleraciones que rebasan el 15% del valor de la aceleración de la gravedad (o 150 gals), producen daños y efectos considerables, sobre todo para los tipos constructivos que predominan en México (Gutiérrez Martínez, 2006).

Basado en lo anterior y empleando los registros históricos de grandes sismos en México, los catálogos de sismicidad y datos de aceleración del terreno, se ha definido la Regionalización Sísmica de México. La Comisión Federal de Electricidad ha elaborado un mapa con cuatro regiones sísmicas . Este mapa permite conocer, el nivel de peligro sísmico que tiene un área en particular. Clasifica el territorio mexicano en regiones de la A a la D, con un nivel creciente de peligro.

Con esta clasificación puede emplearse en los reglamentos de construcción para fijar los requisitos mínimos a seguir por parte de los constructores en el diseño de las edificaciones y otras obras civiles de tal manera que éstas resulten suficientemente seguras ante los efectos producidos por un sismo.

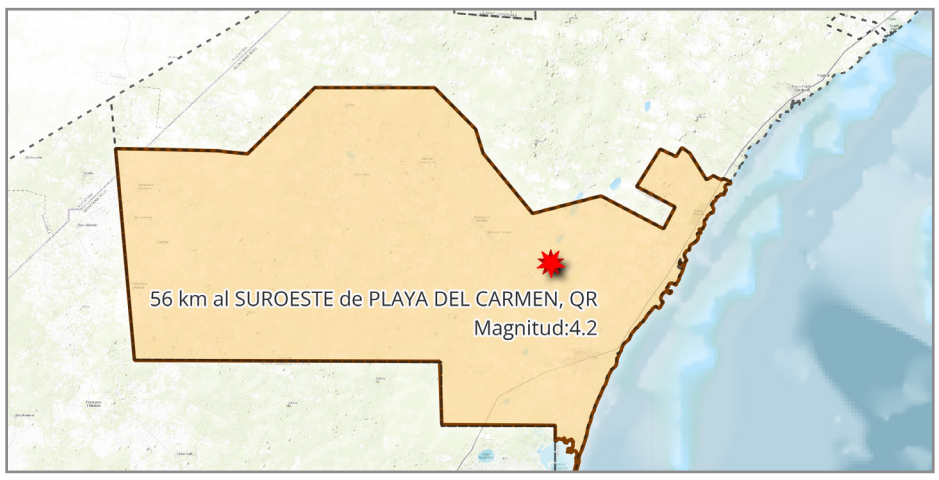
Figura 69. Regionalización sísmica de México



Fuente: Comisión Federal de Electricidad (2008)

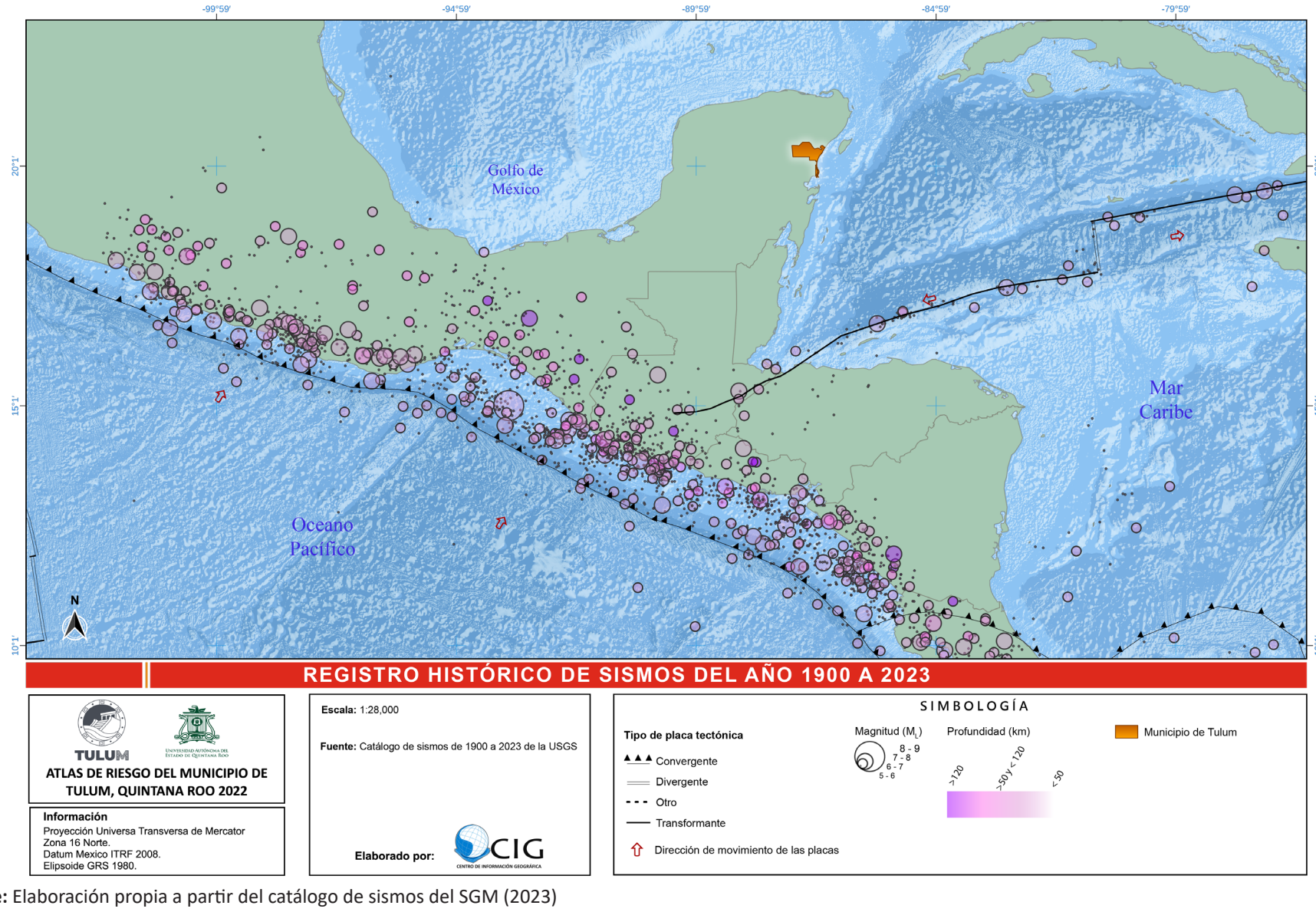
La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos de sismos y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% de g. En la zona D ocurren con frecuencia temblores de gran magnitud (M > 7) y las aceleraciones del terreno pueden ser superiores al 70% de g. Los niveles de sismicidad y de aceleración propios de las zonas B y C están acotados por los valores correspondientes de A y D, los temblores grandes son poco frecuentes y se estima que las aceleraciones se mantendrán por debajo del 70% de g. De acuerdo con la Regionalización Sísmica de la CFE, todo el territorio de Tulum pertenece a una de las regiones con menos actividad sísmica registrada en el país. Esto se debe a que está en una zona menos activa que por ejemplo la zona costera del Pacífico. Quintana Roo pertenece a la zona A y no ha reportado sismos importantes desde hace más de 100 años.

Figura 70. Sismos registrados en la superficie del municipio de Tulum



Fuente: Catálogo de sismos del SGM (2023)

Figura 71. Mapas del registro histórico de sismos (Periodo de 1900 a 2023)



Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo de sismos del SGM (2023)

5.1.3. Tsunamis

Inicialmente el término tsunami proviene del japonés y se le podría dar un significado de ola de puerto; internacionalmente se usa para designar el fenómeno que en español se denomina maremoto (IGN, 2021; CENAPRED, 2014). En la actualidad este término se ha sido adoptado por la comunidad científica a nivel mundial.

Tsunami se utiliza para referirse a una secuencia de olas con gran energía y de onda larga que se producen en el agua al ser esta empujada y desplazada violentamente (IGN, 2021). El movimiento inicial que provoca la generación de los tsunamis es una dislocación vertical de la corteza terrestre en el fondo del océano, ocasionada por un sismo. Sin embargo, existen otros generadores causales de menos frecuencia, como: erupciones de volcanes sumergidos, impacto de meteoritos, deslizamientos submarinos y explosiones nucleares (CENAPRED, 2014).

Por su parte, la NOAA (2023) (National Oceanic and Atmospheric Administration) define a un tsunami como una serie de olas causadas por terremotos o erupciones volcánicas submarinas (https://oceanservice.noaa.gov/facts/tsunami.html). Asimismo, como señala IGN (2021), por sus características físicas, los tsunamis pueden ser muy destructivos, pero por fortuna ocurren con poca frecuencia en la Tierra, alrededor de uno al año.

De la misma manera, la NOAA (2023) destaca que, en las profundidades del océano, las olas de los tsunamis no aumentan drásticamente en altura. Pero a medida que las olas viajan tierra adentro, alcanzan alturas cada vez más altas a medida que disminuye la profundidad del océano (figura 72).

La velocidad de las olas de un tsunami depende de la profundidad del océano y no de la distancia desde la fuente de la ola. Las olas de los tsunamis pueden viajar tan rápido sobre aguas profundas, y solo disminuyen la velocidad cuando llegan a aguas poco profundas (figura 72). Si bien, los tsunamis a menudo se denominan maremotos, los oceanógrafos desaconsejan este nombre porque las mareas tienen poco que ver con estas olas gigantes (NOOA, 2023).

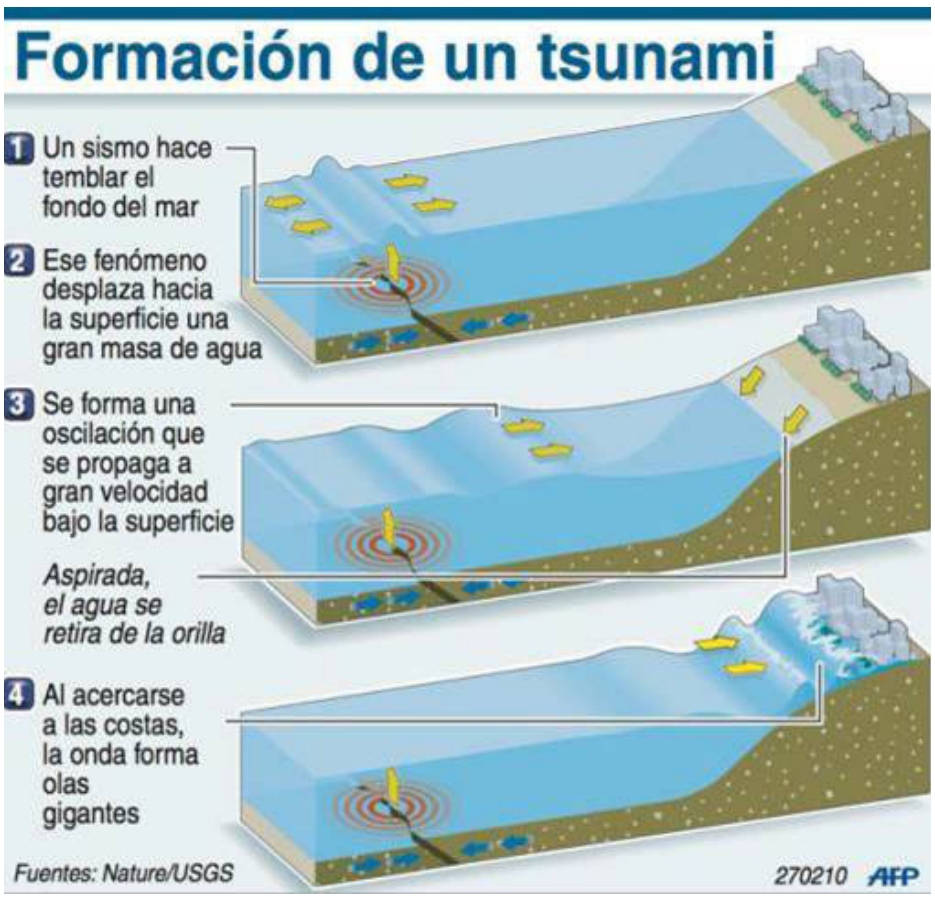
Figura 72. Tsunami: altura, longitud de onda y velocidad



Fuente: https://www.lifeder.com/tsunami/

Por otro lado, sus características hacen que en alta mar pasen inadvertidos, pero cuando llegan a la costa, su velocidad ya disminuyo su altura aumento, generando inundaciones, arrastre de objetos, corrientes y efectos de amplificación y resonancia en puertos y bahías, entre otros fenómenos (figura 73).

Figura 73. Formación de un los Tsunamis



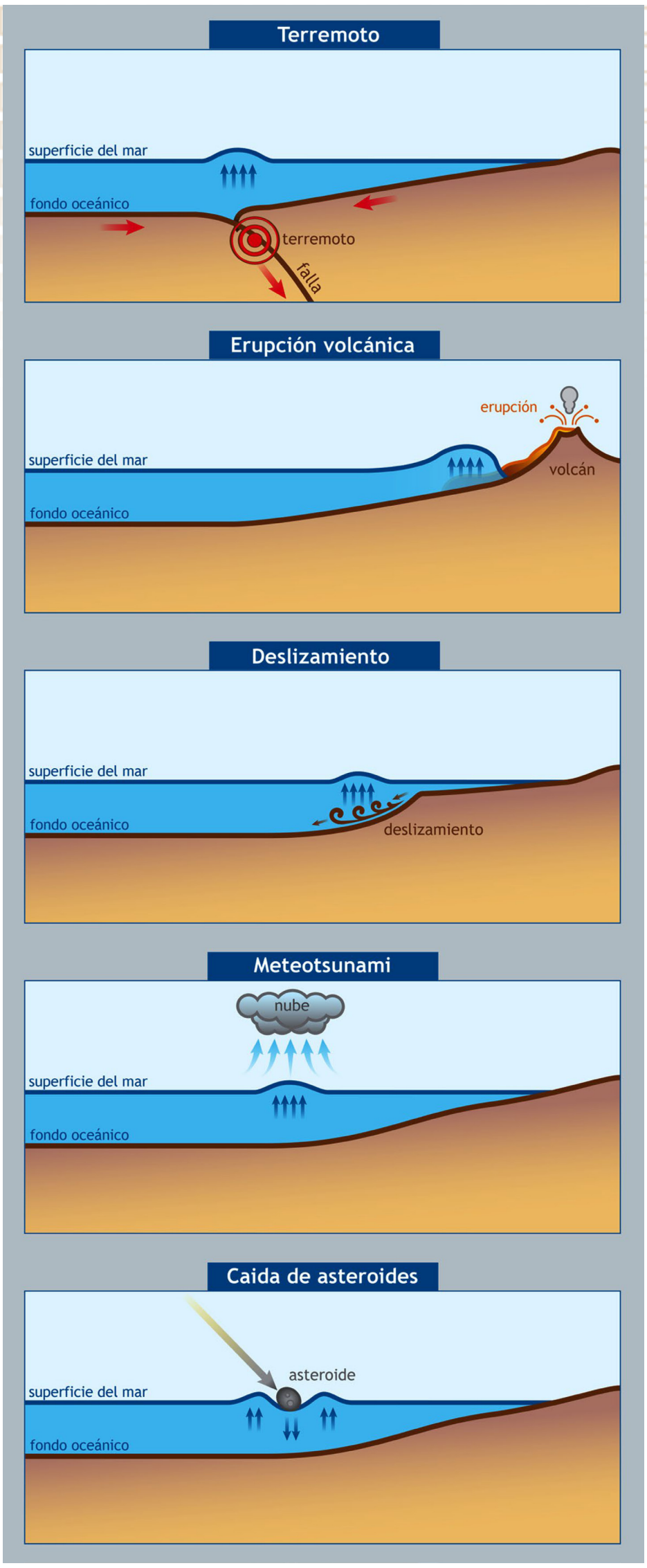
Fuente: ONAMET: https://onamet.gob.do/index.php/tsunami/concepto-tsunami

Estos efectos pueden incrementarse cuando el tsunami coincide con pleamar, es decir, el momento más alto de una marea (IGN, 2021). Los alcances de un tsunami no se limitan al litoral marítimo o del agua embalsada, sino que puede propagarse por ríos y canales conectados y afectar a poblaciones lejanas a la costa.

La energía que transporta la masa de agua desplazada por un tsunami puede ser muy grande y así, puede atravesar fácilmente océanos en poco tiempo, llegando afectar las costas de varios continentes y, como resultado, tener un impacto a gran escala. Por ejemplo, tsunamis que se originaron en aguas de Chile (mayo de 1960) y de Alaska (marzo de 1964), se desplazaron grandes distancias y arribaron a litorales de México y causaron daños menores (CENAPRED, 2014).

La mayor parte de los tsunamis a nivel mundial tienen su origen por terremotos en el fondo del mar o cercanos a la costa. En menor medida son causados por deslizamientos costeros o submarinos y erupciones volcánicas (figura 73). No obstante, estas causas se pueden combinar, por ejemplo, un terremoto que dispara un deslizamiento o una erupción volcánica que se asocia a un deslizamiento por colapso del edificio volcánico (IGN, 2021).

Figura 74. Orígenes más comunes de los Tsunamis



Fuente: IGN (2021). Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de maremotos. Edición comentada. Instituto Geográfico Nacional. 1ª Edición - Editado en diciembre de 2021. Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado. Madrid, España

Además, como señala el Instituto Geográfico Nacional de España (IGN, 2021), no solo los procesos sismo-tectónicos pueden dar origen a los tsunamis, sino también varios procesos atmosféricos, como la acción del viento o los cambios de presión, estos también pueden provocar oscilaciones del nivel del mar de gran longitud de onda, conocidas como meteotsunamis (figura 74). En ocasiones, este fenómeno puede verse amplificado por la geometría de la costa y generar grandes amplitudes. Por último, la caída de asteroides de gran tamaño en las masas de agua de la Tierra también podría generar tsunamis, sin embargo, es menos probable que los anteriores (figura 74).

Los tsunamis más destructivos han sido generados por terremotos como el de Tohoku, Japón (2011) con un aproximado de 20,000 personas muertas, el de Sumatra-Andamán (2004) que se generó en el Océano Índico y llego alrededor de 300 mil muertes, o el de Lisboa en 1755, conocido como el Gran Terremoto de Lisboa causando la muerte de entre 60 mil y 100 mil personas. Con relación a los tsunamis generados por volcanes, se encuentra el producido por las erupciones del Krakatoa en Indonesia en 1883, el cual también en 2018 este volcán entró en erupción y produjo un tsunami que provocó la muerte de 437 personas (figura 74).

Tabla 71. Tsunamis que causaron muertes a más de 1.000 km de la fuente según los registros existentes

Fecha			Nº estimado de muertos o desaparecidos			
Día	Mes	Año	Ubicación de la fuente	Locales	Lejanos	Localidades lejanas con víctimas
27	1	1700	Zona de subducción de Cascadia (EE. UU.)	0	2	Japón
1	11	1755	Lisboa (Portugal)	50000	3	Brasil
7	11	1837	Sur de Chile	0	16	EE. UU. (Hawái)
13	8	1868	Norte de Chile**	*25000	7	Nueva Zelandia, Samoa, sur de Chile
10	5	1877	Norte de Chile	277	2005	Fiji, Japón, Perú, EE. UU. (Hawái)
27	8	1883	Krakatoa (Indonesia)	34417	1	Sri Lanka
15	1	1899	Papua Nueva Guinea	0	Cientos	Islas Carolinas, Islas Salomón
9	8	1901	Islas de la Lealtad (Nueva Caledonia)	0	Varios	Islas Santa Cruz
3	2	1923	Kamchatka (Federación de Rusia)	2	1	EE. UU. (Hawái)
27	11	1945	Costa de Makrán (Pakistán)	*4000	15	India
5	4	1946	Isla de Unimak (Alaska, EE.UU.)	5	162	Islas Marquesas, Perú, EE. UU. (California, Hawái)
9	3	1957	Islas Andreanof (Alaska, EE.UU.)	0	20	EE. UU. (Hawái, muertas indirectas por un accidente de avión durante un ejercicio de reconocimiento del tsunami)
22	5	1960	Centro de Chile	2000	226	Japón, Filipinas, EE. UU. (California, Hawái)
28	3	1964	Prince William Sound (Alaska, EE.UU.)	106	18	EE. UU. (California, Oregón)
26	12	2004	Banda Aceh (Indonesia)***	*175827	52072	Bangladesh, India, Kenya, Madagascar, Maldivas, Myanmar, Seychelles, Somalia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tanzanía, Yemen
28	3	2005	Sumatra (Indonesia)	0	10	Sri Lanka (muertes durante la evacuación)
11	3	2011	Tohoku (Japón)	*18432	2	Indonesia, E.E. UU. (California)
28	10	2012	Haida Gwaii (Canadá)	0	1	EE. UU. (Hawái, muerte durante la evacuación)

* Puede incluir víctimas por el terremoto ** Muertes locales y regionales en Chile y el Perú *** Muertes locales y regionales en Indonesia, Malasia y Tailandia

Fuente: Elaboración propia

Tabla 72. Tsunamis que causaron muertes a más de 1,000 km

Día	Mes	Año	Localización de la fuente	Nº estimado de muertos o desaparecidos
31	10	1975	Fosa de Filipinas	1
29	11	1975	Hawái (EE.UU.)	2
16	8	1976	Bahía de Moro (Filipinas)	4376
19	8	1977	Sumbawa (Indonesia)	189
18	7	1979	Isla Lembata (Indonesia)**	1239
12	9	1979	Irian Jaya (Indonesia)	100
16	10	1979	Riviera francesa**	9
12	12	1979	Nariño (Colombia)	* 600
1	9	1981	Islas Samoa	Pocos
26	5	1983	Noshiro (Japón)	100
10	8	1988	Islas Salomón	1
22	4	1991	Limón (Costa Rica)	2
2	9	1992	Costa de Nicaragua	170
12	12	1992	Mar de Flores (Indonesia)	1169
12	7	1993	Mar de Japón	208
2	6	1994	Java (Indonesia)	238
8	10	1994	Isla de Halmahera	1
4	11	1984	Skagway (Alaska, EE.UU.)**	1
14	11	1994	Islas Filipinas	* 81
14	5	1995	Timor (Indonesia)	11
9	10	1995	Manzanillo (México)	1
1	1	1996	Islas de Célebes (Indonesia)	9
17	2	1996	Irian Jaya (Indonesia)	110
21	2	1996	Perú septentrional	12

Día	Mes	Año	Localización de la fuente	Nº estimado de muertos o desaparecidos
17	7	1998	Papua Nueva Guinea	1636
17	8	1999	Bahía Izmit (Turquía)	155
26	11	1999	Islas Vanuatu	5
23	6	2001	Perú meridional	26
25	9	2003	Hokkaido (Japón)	2
26	12	2004	Banda Aceh (Indonesia)	*^ 227899
28	3	2005	Sumatra (Indonesia)	10
14	3	2006	Isla de Seram (Indonesia)	4
17	7	2006	Isla de Java (Indonesia)	802
1	4	2007	Islas Salomón	50
21	4	2007	Chile meridional	8
15	8	2007	Perú Meridional	3
29	9	2009	Islas Samoa	192
12	1	2010	Haití	7
27	2	2010	Chile meridional	256
25	10	2010	Mentawai (Indonesia)	431
11	3	2011	Tohoku (Japón)	*^ 18434
6	2	2013	Islas Salomón	10
16	9	2015	Centro de Chile	8
17	6	2017	Groenlandia**	4
28	9	2018	Sulawesi (Indonesia)	*2256
22	12	2018	Krakatoa (Indonesia)***	437
Total				**254,639**

* Puede incluir muertes a causa del terremoto
** Tsunami generado por deslizamiento de tierras
***Tsunami** generado por una erupción volcánica
^ Incluye personas desaparecidas /muertas cerca y lejos de la fuente
Fuente: COI-UNESCO (2019).

Tabla 73. Tsunamis regionales y locales con más de 2000 muertes

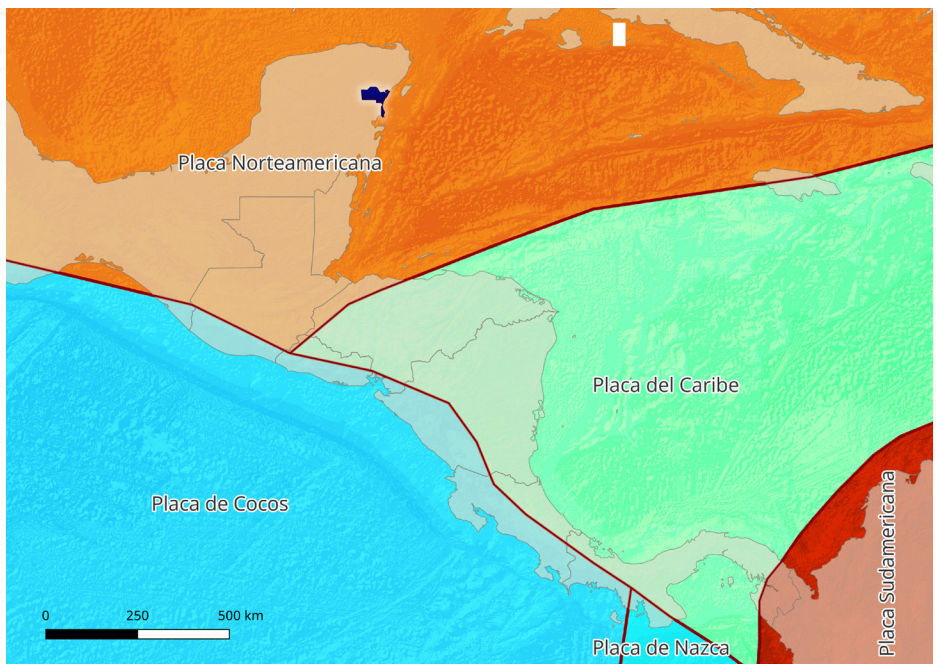
Día	Mes	Año	Localización de la fuente	Nº estimado de muertos o desaparecidos
21	7	365	Isla de Creta (Grecia)	5000
2	8	887	Niigata (Japón)	2000
31	10	1341	Prefectura de Aomori	2600
20	9	1498	Mar de Enshunada (Japón)	5000
8	2	1570	Centro de Chile	2000
18	1	1586	Bahía de Ise (Japón)	*8000
3	2	1605	Nankaido (Japón)	5000
2	12	1611	Sanriku (Japón)	5000
17	2	1674	Mar de Banda (Indonesia)	2244
20	10	1687	Perú meridional	*5000
7	6	1692	Puerto Royal (Jamaica)	2000
30	12	1703	Península de Boso(Japón)	*5000
28	10	1707	Mar de Enshunada (Japón)	2000
28	10	1707	Nankaido (Japón)	*5000
29	8	1741	Hokkaido (Japón)**	2000
29	10	1746	Centro de Perú	4800
20	5	1751	Noroeste de Honshu (Japón)	2100
1	11	1755	Lisboa (Portugal)	* 50000
24	4	1771	Islas Ryukyu (Japón)	13486
2	5	1783	Estrecho de Mesina (Italia)	* 30000
21	5	1792	Isla de Kyushu (Japón)	15000
24	12	1854	Nankaido (Japón)	* 3000
13	8	1868	Krakatoa (Indonesia)	34417
10	5	1877	Chile Septentrional	2282
27	8	1883	Sanriku (Japón)	36000
15	6	1896	Mar de Banda	* 27122
29	9	1899	Banda Sea, Indonesia	* 2460
28	12	1908	Estrecho de Messina (Italia)	2000
1	9	1923	Bahía de Sagami (Japón)	2144
2	3	1933	Sanriku (Japón)	3022
26	6	1941	Mar de Andamán (India)	5000
22	5	1960	Chile Meridional	^ 2226
16	8	1976	Golfo de Moro (Filipinas)	4456
12	12	1992	Mar de Flores (Indonesia)	* 2500
26	12	2004	Banda Aceh (Indonesia)	*^227899
11	3	2011	Tohoku (Japón)	*^18434
28	9	2018	Sulawesi (Indonesia)	*2256
Total				**508,525**

* Puede incluir muertes a causa del terremoto
** Tsunami generado por deslizamiento de tierras
***Tsunami** generado por una erupción volcánica
^ Incluye personas desaparecidas /muertas cerca y lejos de la fuente
Fuente: COI-UNESCO (2019).

En México, un riesgo aún mayor son los tsunamis generados por sismos en la Fosa Mesoamericana, que es la zona de hundimiento de la Placa de Cocos y de la Placa de Rivera bajo la Placa de Norteamérica, adyacente al litoral suroccidental. Haciendo un recuento de ellos tenemos los ocurridos en: Zihuatanejo, Guerrero, en noviembre de 1925, que afectó con olas de 11 metros; el de Cuyutlán, Colima, en septiembre 1985, con olas de 10 metros de altura, que causaron cuantiosos daños y pérdidas de vidas; el de Lázaro Cárdenas, Michoacán e Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, con olas de 3 metros de altura, y el de octubre de 1995, en varias poblaciones costeras de Colima y Jalisco, con olas de hasta 5 metros de altura que causaron algunos daños de consideración y una víctima (CENAPRED, 2014).

Para las costas de Quintana Roo, situadas sobre la Placa de Norteamérica, los eventos sísmicos o movimientos de placas tectónicas originados entre la Placa de Norteamérica y la Placa del Caribe pueden generar alerta de probabilidad de peligro de tsunami, lo que puede poner en alerta a sus municipios costeros incluyendo el municipio de Tulum.

Figura 75. Placas tectónicas de la región Caribe - Pacífico



Fuente: Elaboración propia

Generación y características generales de los Tsunamis

Como ya se señaló la causa más frecuente de generación de tsunamis son los terremotos, siendo estos los responsables de al menos el 80% de los tsunamis (IGN, 2021). Los terremotos ocurren principalmente en las zonas cercanas a los bordes de placas litosféricas (figura 75). Estos se producen en todas las cuencas oceánicas del mundo, pero no todos generan tsunamis (figura mundo). Los factores que influyen en la generación de tsunamis principalmente son: la magnitud del sismo y el tamaño de la falla que rompe y el desplazamiento en esta, su profundidad y el tipo de ruptura. También influye el espesor de la capa de agua, ya que cuanto mayor sea el volumen de agua que desplaza, mayor será el tsunami (IGN, 2021).

De acuerdo con el CENAPRED (2014) para que un sismo genere un tsunami, es necesario que:

a). el punto de origen del sismo (hipocentro) en el interior de la Tierra, donde empieza la ruptura, se extienda formando un plano de falla o una parte mayoritaria de su área de ruptura, esté bajo el lecho marino, a una profundidad menor a 60 km (sismo superficial);

b). ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas; es decir, que la falla tenga movimiento vertical: que no sea solamente de desgarre, con movimiento lateral, y

c). en cierto lapso el sismo libere suficiente energía, y que ésta se transmita eficientemente.

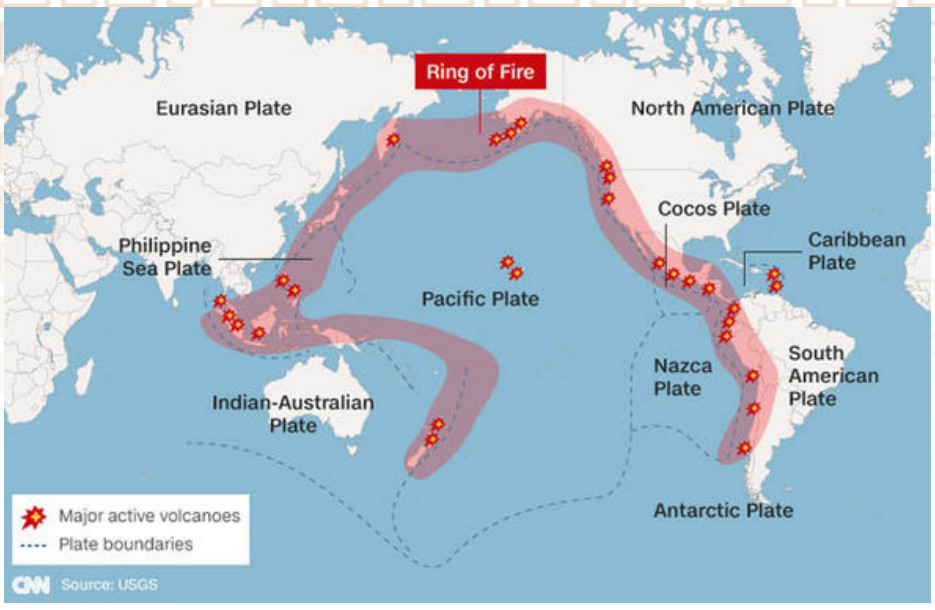
En cuanto al tamaño del terremoto, se necesita una magnitud mínima para que genere un tsunami, esto es, para que libere la suficiente cantidad de energía capaz de desplazar el volumen de agua necesario. Esta magnitud mínima dependerá del conjunto de factores anteriormente mencionados (profundidad, tipo de ruptura de falla y espesor de la capa de agua). En general se estima que un terremoto con magnitud momento (Mw) mayor que 6 ya tiene energía suficiente para generar un tsunami

Localización de zonas generadoras de tsunamis

El 94% de los tsunamis ocurridos han tenido su origen en el Océano Pacifico (CENAPRED, 2014). Específicamente en lo que se conoce como el "Anillo de Fuego". Esto debido a la gran cantidad de grandes terremotos asociados con las zonas de subducción a lo largo de los márgenes de la cuenca del Océano Pacífico. Existen zonas de subducción con fosas de aguas profundas asociadas frente a Chile, Alaska, Japón e Indonesia, por ejemplo, que han producido grandes terremotos y tsunamis

devastadores, muchos de los cuales causaron daños y pérdidas de vidas en las islas de Hawái (figura 76).

Figura 76. Anillo de Fuego

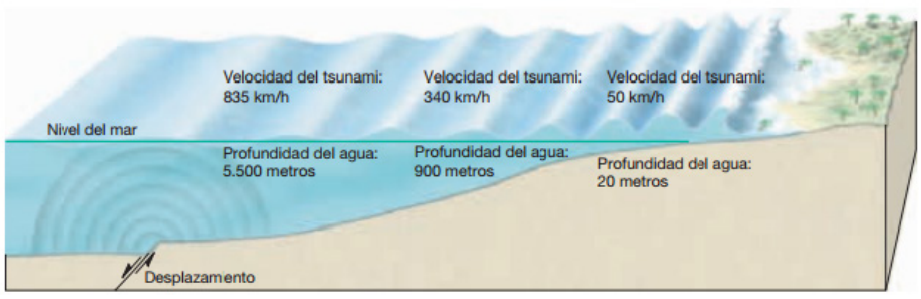


Fuente: USGS.

Los lugares principales de generación de tsunamis son: zonas cercanas al borde de placas tectónicas de subducción, el fondo oceánico con grandes pendientes y actividad volcánica cercana a la costa (figura 76).

Desde donde se generan, mientras se desplazan por aguas profundas, las olas de los tsunamis son de gran longitud (cientos de kilómetros) y exigua altura (centímetros). No obstante que se propagan a gran velocidad (cientos de kilómetros/hora), visualmente esto los hace indetectables desde embarcaciones y aviones. De acuerdo con CENAPRED (2014) sus periodos (lapso entre el paso de dos olas sucesivas) son de 15 a 60 minutos. NO se debe confundir con las olas cortas de tormentas generadas por el viento, que comúnmente llegan a las costas, NI con las ondas mucho más extensas de las mareas, que una a dos veces arriban todos los días (figura 77).

Figura 77. Velocidad del tsunami y profundidad



Fuente: Tomado de https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/otros-temas/516-que-es-un-tsunami.

Los tsunamis se clasifican, de acuerdo con su lugar de arribo a la costa y la distancia (o el tiempo de desplazamiento) desde su punto de origen (CENAPRED, 2014), en:

- ***Tsunamis locales.*** El lugar de arribo a la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación (delimitada por el área de dislocación del fondo marino); por tiempo de desplazamiento: a menos de una hora (figura 78).



Figura 78. Tsunami ocasionado por un sismo de Magnitud 8.1 en Michoacán, México el 19 de septiembre de 1985. Tardó solo 30 segundos para llegar a Lázaro Cárdenas y 23 a Acapulco (https://www.gob.mx/cenapred/artículos/tsunami-ocasionado-por-un-sismo-de-magnitud-8-1-en-michoacan-mexico-el-19-de-septiembre-de-1985).

- ***Tsunamis regionales.*** El litoral invadido está a no más de 1,000 km o a pocas horas de viaje de la zona de generación.

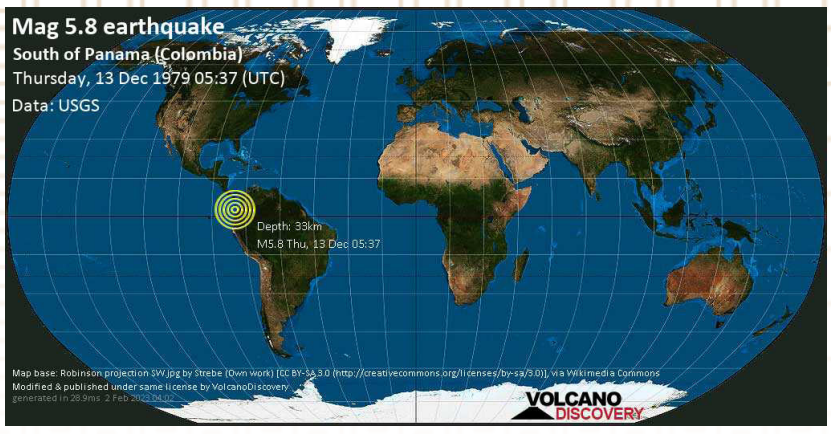


Figura 79. Tsunami ocasionado por un sismo por un sismo en las costas de Colombia el 12 de diciembre de 1979, que tardó 4 horas para llegar a Acapulco (https://www.allquakes.com/es/sismos/informe-sismo/3043847/mag5quake-Dec-13-1979-south-of-Panama-Colombia.html).

- ***Tsunamis lejanos (remotos, transpacíficos o transoceánicos).*** El sitio de arribo está muy alejado, en el Océano Pacífico, a más de 1,000 km de distancia de la zona de generación, a aproximadamente medio día o más de viaje.



Figura 80. Tsunami, ocurrido tras un sismo en Chile el 22 de mayo de 1960; tardó unas 13 horas en llegar a Ensenada (México) (https://www.gob.mx/cenapred/artículos/tsunami-del-22-de-mayo-de-1960-valdivia-chile)



Figura 81. El maremoto generado en Japón el 16 de mayo de 1968; demoró 14 horas en arribar a Manzanillo (México). Tomado de https://www.abc.es/internacional/abci-peores-terremotos-japon-201103110000_noticia.html

Propagación y tiempo de desplazo

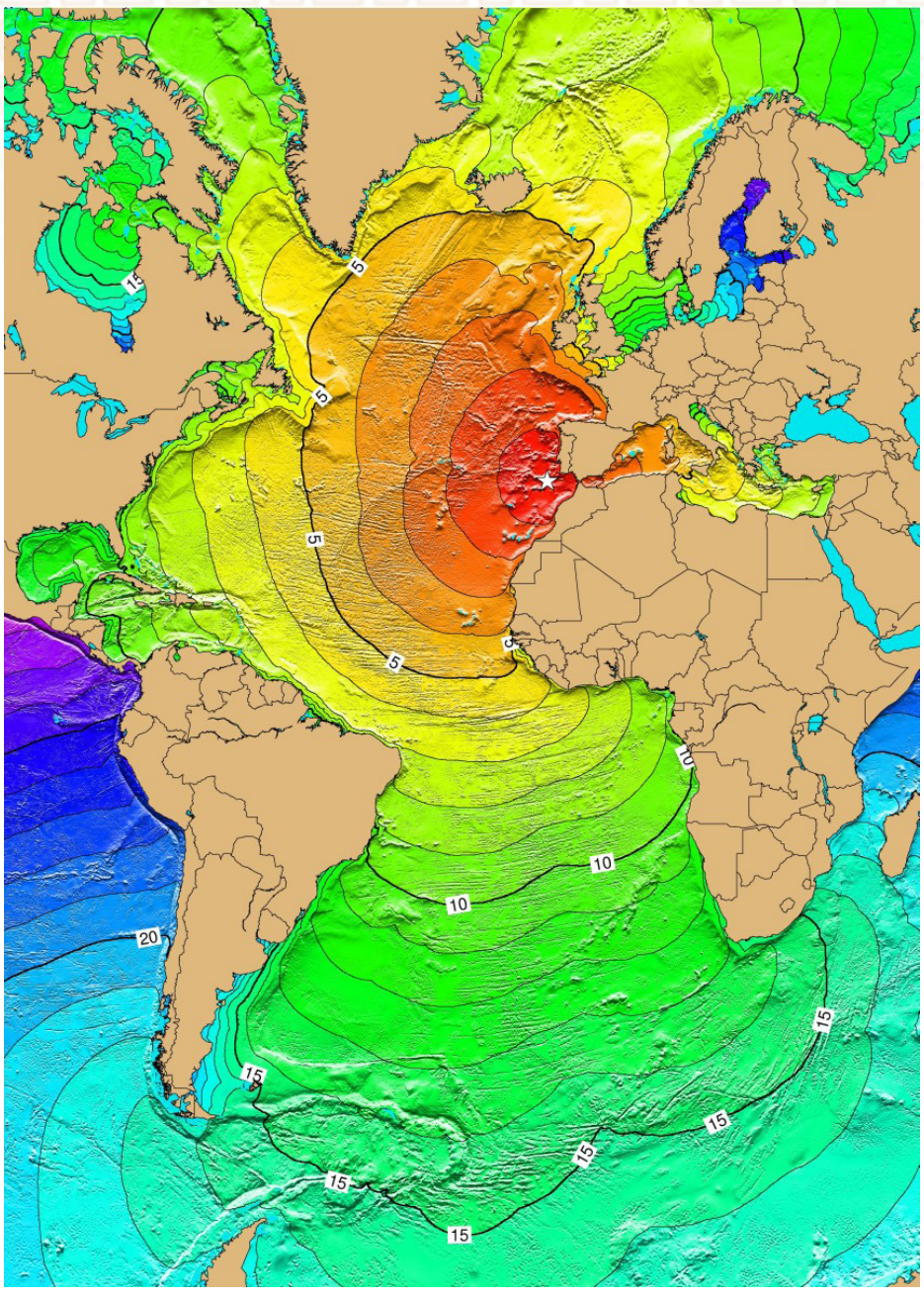
Al producirse un tsunami, este se propaga por el océano en todas las direcciones, atravesándolo y llegando a zonas costeras.

Si estas oscilaciones tienen energía suficiente, pueden atravesar toda la cuenca oceánica y afectar a costas lejanas (IGN, 2021). Cuanto más lejos se encuentre una ubicación o ciudad costera de la zona de generación, más tiempo tardará en llegar a su ubicación (figura 82).

Por ejemplo, una posible afectación por amenaza de tsunami para el municipio de Tulum sería que el epicentro se presentará en Puerto Rico, como se muestra en la siguiente figura, donde se muestran los tiempos de viaje del tsunami del terremoto de magnitud 7.3 Mw ocurrido el 11 de octubre de 1918 en el Pasaje de Mona, al oeste de Puerto Rico, que

fue causado por el desplazamiento a lo largo de cuatro segmentos de una falla normal, orientada N-S en el Cañón de Mona (NOOA, 2006). Los tiempos fueron calculados con el software Tsunami Travel Times (TTT). Los contornos rojos son para tiempos de llegada de 1 a 4 horas, en amarillo de 5 a 6 horas, en verde de 7 a 14 horas y en azul de 15 a 21 horas. No obstante, estos mapas no proporcionan información sobre la altura o la fuerza de la ola.

Figura 82. Mapa de tiempo de viaje del terremoto de Puerto Rico, 1918.



Fuente: Mapa que muestra las isócronas o líneas de tiempo de viaje del tsunami calculado desde la fuente hacia los puntos de arribo en litorales. En rojos tiempos de llegada de 1 a 4 horas, en amarillo de 5 a 6 horas, en verde de 7 a 14 horas y en azul de 15 a 21 horas. NOAA (2006), COI-UNESCO (2019).

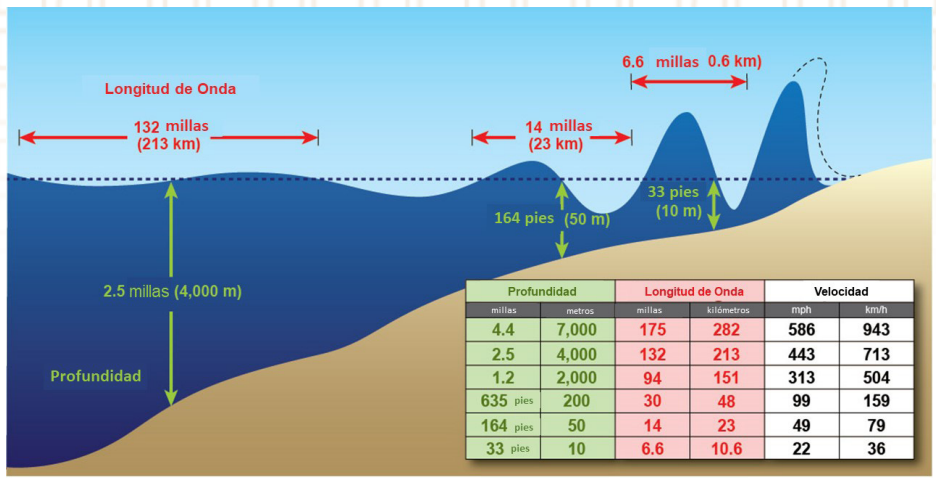
Sin embargo, hay varias situaciones en las que los tiempos de llegada estimados pueden no coincidir con los tiempos de llegada observados de las olas del tsunami, incluidos, entre otros, los siguientes:

- La batimetría no es precisa en las proximidades del epicentro.
- El epicentro no está bien ubicado o su hora de origen es incierta
- El epicentro está en tierra y se debe seleccionar un pseudo-epicentro frente a la costa
- La batimetría no es precisa en las proximidades de la estación de notificación
- Los efectos de propagación no lineal pueden ser importantes en aguas poco profundas
- Es posible que los tiempos de viaje observados no representen la primera ola, sino que representen llegadas posteriores

Como señala CENAPRED (2014), al acercarse las olas de los tsunamis a una costa de pendiente suave (una playa, por ejemplo), a medida que disminuye la profundidad del fondo marino también decrece su velocidad, las longitudes de onda se acortan, la energía se concentra y la altura se incrementa, con potencialidad destructiva (figura 83).

En otras palabras, a medida que sus olas largas de un tsunami se mueven a través del océano y se reducen a medida que se acercan a la costa (figura 83). Por ejemplo, la velocidad del tsunami se puede calcular tomando la raíz cuadrada del producto de la aceleración de la gravedad, que es 9.8 metros por segundo al cuadrado (32.2/m2 pies), y la profundidad del agua. En 4,600 metros (15,000 pies) de agua, esto equivale a casi 765 km/h (475 mph). A mayor profundidad del epicentro del tsunami mayor velocidad de propagación y de longitud de onda. De acuerdo con la NOOA (https://www.weather.gov/jetstream/tsu_prop) a velocidades como esta, un tsunami viajará desde las islas Aleutianas de Alaska hasta Hawái en unas cinco horas; o desde la costa de Portugal hasta Carolina del Norte en ocho horas y media.

Figura 83. Trayectoria de olas a través del océano



Profundidad		Longitud de Onda		Velocidad	
millas	metros	millas	kilómetros	mph	km/h
4.4	7,000	175	282	586	943
2.5	4,000	132	213	443	713
1.2	2,000	94	151	313	504
635 pies	200	30	48	99	159
164 pies	50	14	23	49	79
33 pies	10	6.6	10.6	22	36

Fuente: Tomado de NOOA: https://www.weather.gov/jetstream/tsu_prop

Sin embargo, la interacción de las olas de los tsunamis con la costa es mucho más compleja, su altura de los tsunamis dependerá de:

d). las características de las olas en mar abierto;

e). la batimetría;

f). la pendiente del fondo marino;

g). la configuración del contorno de la costa;

h). la refracción;

i). la reflexión, y

j). el atrapamiento de sus olas en las diversas formaciones fisiográficas costeras: bahías, golfos, penínsulas, islas, cabos, deltas fluviales, lagunas costeras, etc.).

La combinación de los factores anteriores hace que la evaluación del comportamiento local del arribo de un tsunami sea un problema complejo, y que, aun en distancias cortas, la altura máxima de sus olas varíe de sobremanera a lo largo de la costa (CENAPRED, 2014).

Inundación

El impacto del tsunami en la costa va a depender de la distancia a la que se haya generado, la energía producida, la forma del relieve submarino por el que viaje y, por supuesto, la forma y orografía costera. En la costa el peligro que supone un tsunami es triple: por un lado, la súbita inundación, en segundo lugar, las fuertes corrientes que genera y, por último, el acarreo de objetos que hace más peligroso sobrevivir a la corriente.

Una advertencia previa a la inundación súbita es que el agua de la orilla retrocede y deja al descubierto el fondo del océano, pero esto no siempre ocurre (figura 84). Lo anterior se observa cuando la línea de agua de la costa retrocede, a veces un kilómetro o más, quedando expuesto el fondo marino, las rocas y los peces. El retroceso del mar es una señal de la naturaleza que advierte de la llegada de un tsunami (COI-UNESCO, 2019).

Figura 84. El retroceso del mar



Fuente: https://es.quora.com/Cu%C3%A1les-son-las-se%C3%B1ales-de-que-un-Tsunami-est%C3%A1-por-ocurrir

Los centros de alerta contra los tsunamis usan modelos numéricos para predecir los tiempos de llegada de las olas (COI-UNESCO, 2019), la dirección de la energía máxima del tsunami, la fuerza de las corrientes de agua cerca de la costa, y la altura de la ola en la costa.

Toda esta información es crucial para una respuesta oportuna en caso de emergencia por un tsunami. La observación es muy importante en estos momentos (COI-UNESCO, 2019). Por ejemplo, una ola rompiente es la que ha alcanzado tal pendiente que el seno adelanta al cuerpo y se derrumba en una masa de agua turbulenta sobre la orilla o sobre un arrecife. Normalmente, el rompimiento ocurre cuando la profundidad del agua es 1.28 veces menor que la altura de la ola. Se pueden distinguir tres tipos de rompiente según la pendiente del fondo:

k). rompientes de derrame (sobre un fondo casi plano) que forman un parche espumante en la cresta y rompen gradualmente a una distancia considerable;

l). rompientes de zambullida (sobre una gran pendiente del fondo) cuyas crestas se curvan con una tremenda masa sobresaliente y luego se rompen con gran estrépito;

m). rompientes refluentes (sobre pendientes del fondo muy empinadas) que llegan a la playa sin romperse.

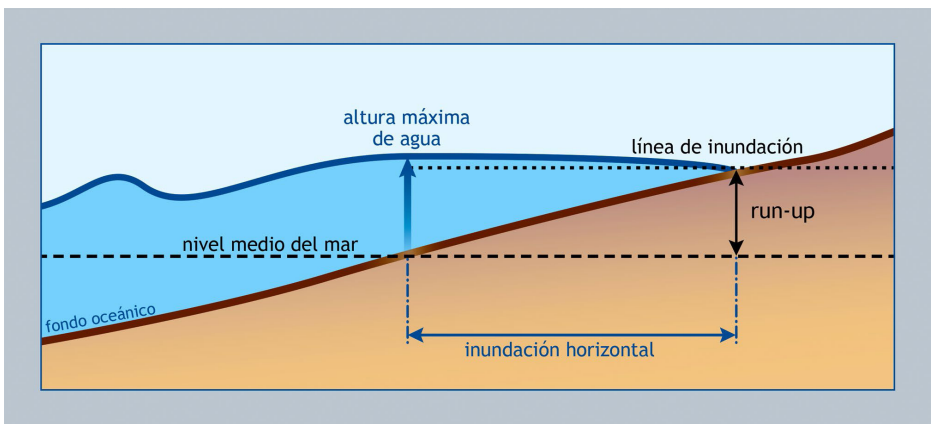
También existen las olas sísmicas, cuando un tsunami se origina por un sismo. De la misma manera, pueden aparecer una serie de oscilaciones del nivel del mar que preceden a la llegada de las olas principales de un tsunami.

Como ya se señaló, los tsunamis pueden ocasionar cambios rápidos del nivel del agua y corrientes peligrosas e impredecibles en puertos y ensenadas. En las áreas costeras pueden llegar a alcanzar una altura de 10 metros o más, aunque se han llegado a registrar 52 metros en un caso extremo. Conjuntamente pueden tener repercusiones, como crecidas instantáneas o fuerte marejada.

Comúnmente, la primera ola no es la mayor de todas y el peligro puede persistir durante varias horas tras la primera llegada. Estas pueden empujar tierra adentro grandes toneladas de arena, rocas, barcos que pueden causar daño.

Como señala IGN (2021), la violencia de un tsunami se puede medir a partir del valor de run-up o altura máxima alcanzada por el tsunami tierra adentro, o bien a partir de la altura del tsunami cerca de la costa, que se suele medir con mareógrafos. Los valores de inundación, run-up y altura máxima del tsunami son locales y pueden variar de un lugar costero a otro, según sea el relieve del fondo oceánico y la forma de la costa (figura 85).

Figura 85. Esquema de la propagación de un tsunami



Fuente: IGN, (2021). Características del movimiento del agua en la propagación de un tsunami cerca de la costa y parámetros que definen el impacto de un tsunami: altura máxima, inundación horizontal, línea de inundación y run-up. La altura máxima del tsunami puede estar en cualquier lugar entre la costa y la línea de inundación.

Escalas de magnitud e intensidad de tsunamis

Existen escalas que representan la energía del tsunami y los efectos en las costas, que son escalas de magnitud y de intensidad, respectivamente, de forma semejante a los terremotos. Aunque existen muchas escalas, las más conocidas son:

» IMAMURA (1949) propone una escala en función de la altura de la ola y los daños que estas producen en las zonas costeras.

» AMBRASEYS (1962), es de cuatro grados que van desde muy ligero a fuerte, mediante la descripción de los efectos.

» LIDA (1963) propone una escala de grados relacionando la máxima altura de subida que alcanza en tierra la ola (run up = R), medida sobre el nivel medio del mar, y la energía de los tsunamis correspondientes a diferentes grados de intensidad.

» WIEGEL (1970) combina y adapta ambas escalas (INAMURA-LIDA), se considera de las más utilizadas (tabla 76).

» SOLOVIEV (1970) escalas de intensidad, que consta de cinco grados definidos en función de la altura alcanzada por las aguas en metros y del comportamiento del tsunami y sus efectos.

Tabla 74. Escala de grados de Tsunami según Imamura-Lida, transcrita por Wiegel.

GRADO mag=m	ALTURA de ola H en metros	COTA inundación R máxima en metros	DESCRIPCIÓN de los daños
0	1-2	1-1.5	No produce daños
1	2-5	2-3	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados
2	5-10	4-6	Hombres, barcos y casas son barridos
3	10-20	8-12	Daños extendidos a lo largo de 400 kms de la costa
4	>30	16-24	Daños extendidos sobre más de 500 kms a lo largo de la línea costera

ALTURA de la ola H: Diferencia entre cresta y valle de la ola
COTA máxima de la inundación R: Lugar de la costa donde los efectos son máximos
Fuente: Monge (1993)

Con la escala de grados de tsunami descrita, se puede identificar y diferenciar la magnitud de un evento. De este modo, al señalar que la costa de una determinada región ha sido afectada por 10 tsunamis en 400 años, se puede precisar que de los diez tsunamis acontecidos sólo uno fue de magnitud dos (m = 2) y nueve fueron de magnitud cero (m = 0).

La magnitud de una amenaza natural de tsunami expresa la energía del fenómeno y su intensidad los daños que puede ocasionar en vidas humanas como en infraestructura y en el ambiente.

Papadopoulos, et, al. (s.f.) del Instituto de Geodinámica Observatorio Nacional de Grecia compara las escalas de intensidad y magnitud de los tsunamis con las escalas de terremotos desde 1927 a 2001 (tabla 76). Papadopoulos & Imamura proponen una escala de 12 niveles de intensidad.

Tabla 75. Escalas de intensidad y magnitud de tsunamis

Escala	Tipo	Analogía con escala de terremotos
Intensidad		
Sieberg [1927]	escala de intensidad primitiva de 6 puntos	escalas de intensidad temprana
Ambraseys [1962]	escala de intensidad de 6 puntos mejorada	escalas de intensidad mejoradas
Shuto [2001]	escala de intensidad de 6 puntos desarrollada	escalas de intensidad desarrolladas
Papadopoulos & Imamura [2001]	nueva escala de intensidad de 12 puntos	nuevo EMS ‘92 y ‘98 escala de intensidad de 12 puntos
Magnitud		
Imamura - Iida [40, 50 y 60]	escala de magnitud primitiva	escala de magnitud Richter local
Soloviev [1970]	escala de magnitud primitiva	magnitud de Richter local
Abe [80’s & 90’s]	escala de magnitud	escala de magnitud de olas superficiales
Murty - Loomis [1980]	escala de magnitud	momento – escala de magnitud

Fuente: Elaboración propia con base en Papadopoulos, et, al.(s.f.)

Las escalas permiten calificar los tsunamis basándose en documentos y descripciones históricas que hacen referencia a la magnitud de los daños y a la cota máxima de inundación.

Daños producidos por tsunamis

Los daños típicos producidos por tsunami pueden agruparse de acuerdo con los siguientes grupos: a) Daños producidos por el momento del flujo; b) Daños producidos por la inundación y c) Daños producidos por socavamiento.

A su arribo, los daños materiales pueden ser:

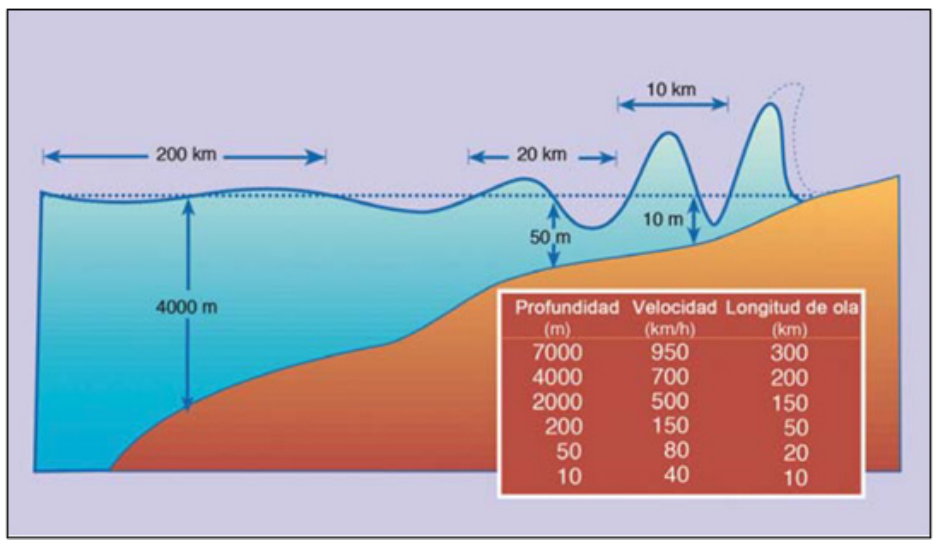
1. *Primarios*: causados directamente por la acción estática del agua (inundación, presión, flotación) en las estructuras, o por su acción dinámica (corrientes, fuerzas de arrastre), y rompimiento de las olas o rebasado de sus aguas en muelles y rompeolas.
2. *Secundarios*: ocasionados por:
   a. Impacto de objetos flotantes o arrastrados por las aguas (embarcaciones, vehículos, etc.) en estructuras fijas.
   b. Incendios o explosiones, inducidos por el impacto de tales objetos flotantes en tanques de almacenamiento de combustible.
   c. Líneas eléctricas caídas.
   d. Derrumbe de edificaciones, por escurrimiento del material térreo de soporte de sus cimientos.
   e. Contaminación por líquidos y/o gases tóxicos, al romperse los recipientes o envases.
   f. También tienen impacto social, pues producen:
      i. Decesos y heridos
      ii. Destrucción de construcciones
      iii. Daños en vías de comunicación, hospitales y escuelas
      iv. Interrupción de servicios públicos (electricidad, telefonía, etc.) y en las actividades cotidianas de la población;
      v. Pérdida de viviendas, desplazamiento y reubicación de asentamientos humanos.

5.1.3.1. Metodología

Parámetros físicos de un tsunami

Los tsunamis viajan desde su área de generación en todas direcciones. La dirección principal de la propagación de la energía es generalmente perpendicular a la dirección de la zona de fractura del terremoto. Su velocidad depende de la profundidad del agua (figura 86).

Figura 86. Altura del tsunami



Fuente: http://www.proteccioncivil.es. En aguas profundas, a menudo un tsunami tiene solo decenas de centímetros de altura, pero ésta crece rápidamente en aguas someras.

Debido a la gran longitud de onda estas olas siempre "sienten" el fondo, es decir, son refractadas, ya que la profundidad siempre es inferior a la mitad de la longitud de onda (valor crítico que separa las olas de agua profunda de las olas de aguas someras). En consecuencia, en todo punto del océano, la velocidad de propagación del tsunami depende de la profundidad oceánica y puede ser calculado en función de ella:

Velocidad de propagación

$$V = \sqrt{gd}$$

En donde:

V= velocidad de propagación

g= aceleración de la gravedad (9.81 m/seg²)

d= profundidad del fondo marino

Para el Océano Pacífico la profundidad media es de 4, 000 m, lo que da una velocidad de propagación promedio de 198 m/s o 713 km/h. Para el municipio de Tulum, el cálculo se haría a partir de los datos correspondientes al Océano Atlántico, donde la profundidad media es de 3,900 m, que se obtiene gracias a una gran meseta cercana a los 3,000 m de profundidad que constituye casi todo su fondo, unida a las grandes depresiones que se encuentran en los bordes de esta y que llegan a los 8, 800 m en las inmediaciones de Puerto Rico (OCEANA, 2016). Lo anterior da una velocidad de propagación promedio para el Atlántico de 195.6 m/s (704.16 km/h).

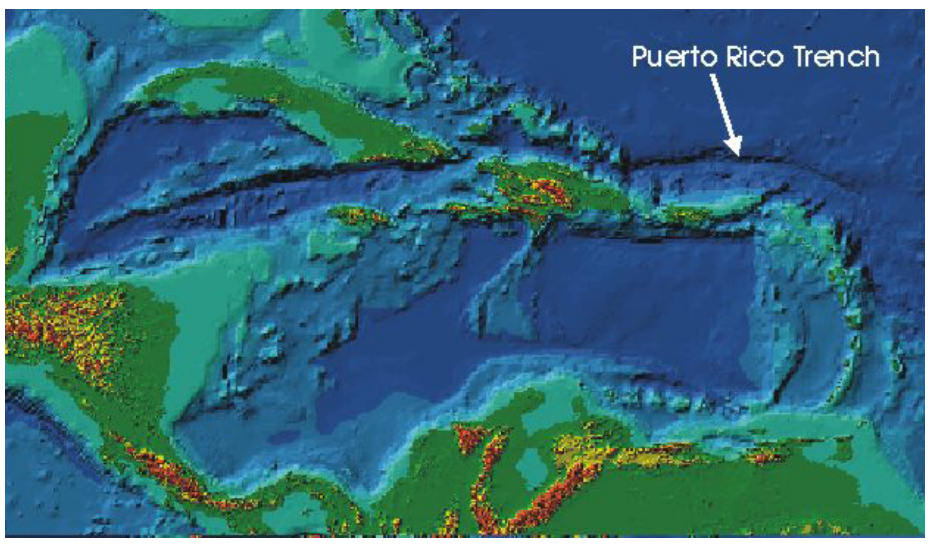
Ahora bien, si calculamos el dato para el Mar Caribe, cuya profundidad promedio es de 2,200 m (Geoenciclipedia, 2023), tendríamos una velocidad de propagación de 146.9 m/s, es decir 528.84 km/h. De este modo, podemos observar que, si la profundidad de las aguas disminuye, la velocidad del tsunami decrece (tabla 77).

Tabla 76. Velocidad de propagación tsunami: Pacifico, Atlántico y Mar Caribe

Aguas profundas	Profundidad media	Velocidad de propagación tsunami
Océano Pacifico	4,000 m	198 m/s o 713 km/h
Océano Atlántico	3,900 m	195.6 m/s o 704.16 km/h
Mar Caribe	2,200 m	146.9 m/s o 528.84 km/h

El Caribe alberga algunas de las áreas geológicamente más activas fuera del Océano Pacífico. Al igual que las islas de Indonesia, esta área tiene una zona de subducción que se encuentra justo al norte de la isla de Puerto Rico, donde la placa de América del Norte se subduce debajo de la Placa del Caribe en la Fosa de Puerto Rico. (Maine ACF, s.f.) Esta área incluye otras depresiones y áreas activas de tectónica de placas que han producido numerosos terremotos, deslizamientos de tierra submarinos, erupciones volcánicas y la consiguiente actividad de tsunamis. Una imagen interpolada sombreada tridimensional detallada del lecho marino del Caribe (figura 87), y específicamente de la Fosa de Puerto Rico y sus alrededores, muestra esta área tectónica y volcánicamente activa.

Figura 87. Islas del Caribe - Terremotos y Erupciones Volcánicas

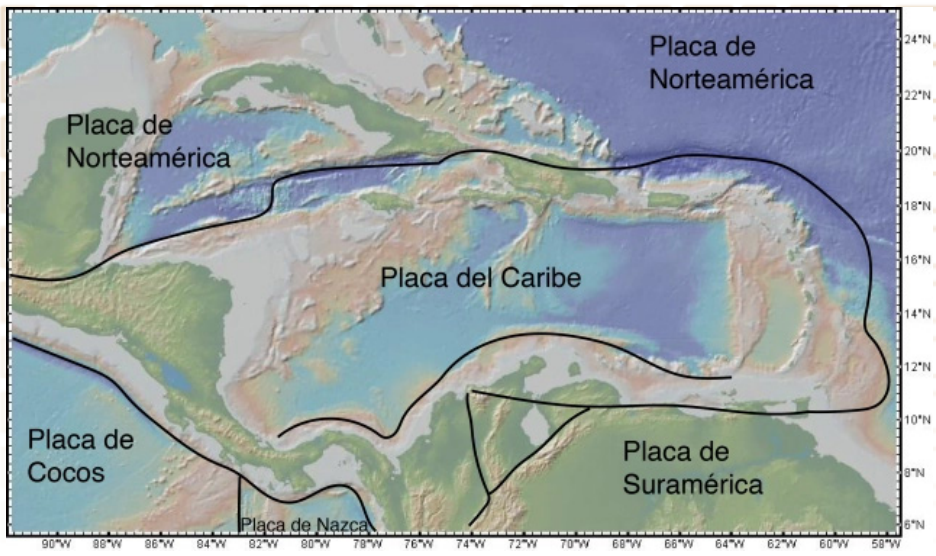


Fuente: Maine ACF (s.f.). 3D batimetría del Mar Caribe mostrando la ubicación de la Fosa de Puerto Rico. Los datos de elevación digital de 30 segundos del conjunto de datos GLOBE y el modelo batimétrico interpolados con datos de 5 minutos del conjunto de datos ETOPO5 (imagen cortesía del Centro Siberiano para Catástrofes Globales).

Debemos tener en cuenta, de la misma manera, que la altura de la ola al llegar a la costa es variable. Al aproximarse a las aguas bajas, las olas sufren fenómenos de refracción y disminuyen su velocidad y longitud de onda, aumentando su altura. En mares profundos estas ondas pueden pasar inadvertidas ya que sólo tiene amplitudes que bordean el metro; sin embargo, al llegar a la costa pueden excepcionalmente alcanzar hasta 20 metros de altura. Un tsunami no es UNA sola ola, sino una secuencia o "tren" de olas que cada 10 a 40 minutos se suceden una tras otra durante un lapso de medio día, un día o más. Usualmente, la ola de mayor altura y potencial destructivo NO es la primera ni la segunda, sino las siguientes: tercera, etc. (CENAPRED, 2014).

Todo el estado de Quintana Roo está situado sobre la Placa de Norteamérica por lo que la costa del municipio de Tulum también, y debido a su ubicación geográfica, los eventos sísmicos o movimientos de placas tectónicas originados entre la Placa de Norteamérica y la Placa del Caribe pueden generar alerta de probabilidad de peligro de tsunami (figura 88). Sin embargo, los eventos de tsunami para esta región han sido muy pocos y sin afectación para el municipio.

Figura 88. Mapa de la Placa del Caribe sus bordes y las placas adyacentes



Fuente: Base topográfica y batimétrica de GeoMapApp, 2018. https://geolpr.com/2018/06/29/el-caribe-tectonico/

Desde el sitio web del Centro para Información Ambiental NCEI (National Centers for Environmental Information Natural Hazards) de la agencia de gobierno de Estados Unidos NOOA (National Oceanic and Atmospheric Administration), se puede acceder a una base de datos de los eventos históricos de tsunamis, (https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml), donde se señalan la fuente del evento, la fecha, la magnitud, altura máxima del agua, muertes y daños materiales, así como el origen del tsunami: sismos, volcanes, movimiento de placas. Algunos eventos no tienen información de recorrido y otros tienen muchos lugares donde se registró una altura de recorrido (runup).

Para conocer los eventos de tsunamis que se han presentado en la Región 74 Mar Caribe, donde se localiza el municipio de Tulum, se realizó una búsqueda de datos en el sistema de Natural Hazards del NCEI (2023). El resultado presenta datos para un periodo de 523 años y 126 eventos, los cuales se consideran significativos para el estado de Quintana Roo y para el municipio (tabla 78 y figura 89).

Tabla 77. Eventos de Tsunami para la Región Caribe (1498 - 2021)

Año	Validez	Causa	Mag.	País	Nombre locación	Lat	Long	Altura máxima del agua (m)	Número de run-up	Casas destruidas	Muertes totales	Daños totales (millones de dólares)
1498	2	1		VENEZUELA	BOCA DE LA SIERPE	9.9	-62.3		1	3		
1530	4	1		VENEZUELA	CUMANA	10.7	-64.1	7.3	4	3	4	
1539	2	1		HONDURAS	CABO DE HIGUERAS	16.2	-88.5		1	1		
1541	-1	1		VENEZUELA	ISLA CUBAGUA	10.8	-64.2		1			
1543	1	1		VENEZUELA	CUMANA	10.7	-64.1		2			
1688	1	1		JAMAICA	PORT ROYAL	17.6	-76.5		1			
1690	4	1	8	ANTIGUA Y BERMUDA	ANTIGUA; SAINT KITTS Y NEVIS	17.5	-61.5		3			
1692	4	3	7.7	JAMAICA	PORT ROYAL	17.8	-76.7	1.8	4	3	3,000	
1726	2	0		VENEZUELA	PENINSULA DE ARAYA	10.633	-64.3		2			
1746	2	1		COSTA RICA	MATINA	10.2	-82.9		1			
1750	1	1		VENEZUELA	CUMANA	10.7	-64.1		1			
1751	-1	1	7.3	HAITI	PUERTO PRINCIPE	18.5	-72.3		0			
1751	3	1	7.3	REPÚBLICA DOMINICANA	AZUA DE COMPOSTELA	18.5	-70.7		3	3		
1751	-1	2		BARBADOS	LESSER ANTILLES				0			
1751	-1	1		HAITI	PUERTO PRINCIPE	18.5	-72.3		0			
1766	-1	1	6.8	CUBA	SANTIAGO DE CUBA	19.9	-76.1		1		40	
1766	1	1	7.5	VENEZUELA	CUMANA	10.47	-64.17		1			
1767	3	1		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MARTINIQUE & BARBADOS	14.4	-61		2			
1769	-1	2		HAITI	PUERTO PRINCIPE	18.5	-72.3		0			
1770	4	3	7.5	HAITI	PUERTO PRINCIPE	18.5	-72.3		4		200	
1775	4	1		CUBA	SANTIAGO DE CUBA	19.9	-76		2			
1775	1	1		HAITI	HAITI: NO SE CONOCE LOCACION	19	-72.3		1			
1775	2	1		HAITI	HAITI Y DOMINICAN REPUBLIC	19	-72.4		2			
1780	-1	9		JAMAICA	SAVANNA LA MAR	18.2	-78.1	3	1			
1781	1	2		JAMAICA	JAMAICA: NO SE CONOCE LOCACION	18.1	-77.3		1			
1781	-1	9		JAMAICA	JAMAICA			3	0	2		
1787	1	1		JAMAICA	BAHIA DE MONTEGO	18.47	-77.92		1			
1795	3	1		TRINIDAD Y TOBAGO	PUERTO DE ESPAÑA	10.7	-61.7		1			
1798	3	1		COSTA RICA	MATINA	10.2	-82.9		1			
1802	2	1		ANTIGUA Y BERMUDA	ANTIGUA ISLAND Y ST. CHRISTOPHER	17.2	-62.4		2			
1802	3	1		VENEZUELA	CUMANA	10.3	-64.5		1			
1812	2	1	7.7	VENEZUELA	LA GUAIRA	10.6	-66.9		1		26,000	
1812	2	1		JAMAICA	KINGSTON	18	-76.8		1			
1821	1	0		COSTA RICA	LA MATINA	10.1	-83.3		1			
1822	3	1	7.6	COSTA RICA	MATINA	10.1	-83.3		3			
1823	4	1		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	SAINT PIERRE	14.4	-61		1			
1824	-1	9		GUADALUPE (TERR. FRÁNCES)	BASSE TERRE	16.7	-62.2		1			
1824	2	1		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	SAINT PIERRE	14.4	-61		1			
1825	1	1	6.3	COLOMBIA	SANTA MARTA	11.1	-74.1		1			
1825	2	1		TRINIDAD Y TOBAGO	PUERTO DE ESPAÑA	10.4	-61.3		1			
1831	1	1		TRINIDAD Y TOBAGO	TRINIDAD Y ST. CHRISTOPHER	12.4	-61.5		2			
1837	-1	9		TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	ISLAS VIRGENES				1			
1839	3	1	7.8	MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MARTINIQUE	14.9	-60.6		1		390	
1842	4	1	8.1	HAITI	CAP-HAITIAN	19.75	-72.2	5	6	3	5,300	
1843	4	1	8.3	GUADALUPE (TERR. FRÁNCES)	POINTE-A-PITRE	16.5	-62.2	1.2	1		5,000	
1843	1	6		GUADALUPE (TERR. FRÁNCES)	ISLA MARÍA GALANTE	15.933	-61.267		1			
1852	2	2		CUBA	SANTIAGO DE CUBA	20	-75.8		1			
1853	4	1	6.7	VENEZUELA	CUMANA	10.5	-64.2	5	4		1,000	
1855	1	1		HONDURAS	TRUJILLO	15.91	-85.96		1			
1856	4	3	7.5	HONDURAS	BAHIA DE HONDURAS	16	-88	5	5			
1860	4	3	7.5	HAITI	ANSE-A-VEAU	18.52	-73.35		4			
1860	3	1		HAITI	PETIT TROU NIPPES	18.55	-73.5		1			
1864	1	1		HAITI	JACMEL	18.2	-72.53		0			
1867	1	1	7.5	VENEZUELA	ISLA DE MARGARITA	10.9	-64.1		2			
1867	4	1	7.5	TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	ISLAS VIRGENES	18.1	-65.1	15.2	61		24	
1868	3	1		TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	ISLAS VIRGENES	18.1	-65.1	1.5	6			
1868	2	1	8.5	VENEZUELA	RIO CARIBE	10.7	-63.1		3			
1870	2	1		GUADALUPE (TERR. FRÁNCES)	GUADALUPE				0			
1871	2	1		MEXICO	S. MEXICO	18.2	-94.5	0.3	1			
1873	1	1		PANAMA	CIUDAD DE PANAMA	8.96	-79.53		2			

Año	Validez	Causa	Mag.	País	Nombre locación	Lat	Long	Altura máxima del agua (m)	Número de run-up	Casas des-truidas	Muertes totales	Daños totales (millones de dólares)
1874	2	1		TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	ISLAS VIRGENES	18.1	-65.1		2			
1881	1	1		JAMAICA	KINGSTON	17.97	-76.8	0.46	1			
1882	4	3	7.9	PANAMA	SAN BLAS ARCHIPELAGO	10	-79	3	3	3		
1887	4	1		HAITI	MOLE SAINT-NICOLAS	19.7	-74.4		4			
1893	2	1		JAMAICA	KINGSTON	17.97	-76.8		1			
1896	2	1		JAMAICA	KINGSTON	17.6	-76.7		1			
1897	1	1		REPÚBLICA DOMINICANA	SANTO DOMINGO	18.5	-69.95		0			
1897	1	1		MONTSERRAT	VOLCÁN SOUFRIERE HILLS	16.72	-62.18		0			
1900	3	1	7.7	VENEZUELA	MANCUTO	11	-66	10	5	1	25	
1902	4	7		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MOUNT PELEE	14.82	-61.17	5	1		23	
1902	4	6		SAN VICENTE Y LAS GRANA-DINAS	VOLCÁN SOUFRIÉRE	13.33	-61.18	1	3		1,680	
1902	2	6		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MOUNT PELEE	14.82	-61.17		1		28,000	
1902	2	6		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MOUNT PELEE	14.82	-61.17		4	1		
1902	2	0		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	FORT-DE-FRANCE	14.602	-61.065		1			
1902	2	0		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MARTINIQUE	14.553	-61.009		1			
1902	4	6		MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MOUNT PELEE	14.82	-61.17	1	1		1,500	
1904	2	1	7.2	PANAMA	BOCAS DEL TORO	9.2	-82.8		1			
1906	4	1		VENEZUELA	CARACAS	10.5	-66.916		6			
1906	1	2		VENEZUELA	MAIQUETIA	10.6	-66.95		1			
1907	4	1	6.2	JAMAICA	JAMAICA	18.667	-76.237	2.5	10		1,000	30
1911	3	8		TRINIDAD Y TOBAGO	TRINIDAD	10.5	-61.2		1			
1916	4	1	7	PANAMA	BOCAS DEL TORO	9.6	-82	1.3	6			0
1916	3	9		REPÚBLICA DOMINICANA	SANTO DOMINGO				1		43	
1916	2	1		VENEZUELA	OCUMARE DE LA COSTA DE ORO	10.46	-67.77		1			
1918	4	3	7.1	TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	PUERTO RICO: MONA PASSAGE	18.7	-67.189	6.1	21		144	4
1918	3	1	6.4	TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	PUERTO RICO	18.441	-67.214		2			
1919	0	1		VENEZUELA	LAGO DE MARACAIBO	10.6	-71.6		1			
1928	-1	9		VENEZUELA	CARUPANO				1			
1929	4	1	6.9	VENEZUELA	CUMANA	10.6	-65.6	6	5	3	50	
1931	1	0		CUBA	COSTA NORTE (LAS VILLAS)	22.8	-80.4	1	2			
1932	2	1	6.7	CUBA	SANTIAGO DE CUBA	19.706	-75.691		1		14	
1932	1	1		VENEZUELA	CUMANA	10.5	-64.2		1			
1939	2	6		GRANADA	KICK ‘EM JENNY VOLCÁN	12.3	-61.63	2	3			
1939	2	1	5.6	CUBA	SANTA CLARA	22.2	-79.1		1			
1946	4	1	7.9	REPÚBLICA DOMINICANA	COSTA NORESTE	19.25	-69	5	8	3	1,790	
1946	4	1	7.5	REPÚBLICA DOMINICANA	COSTA NORESTE	19.5	-69.5	0.6	13		75	
1950	2	1	6.4	VENEZUELA	EL TOCUYO	9.71	-69.819		1		100	
1953	2	1	7.2	REPÚBLICA DOMINICANA	PUERTO PLATA	19.8	-70.7	0.06	1			
1955	2	1	5.5	VENEZUELA	FUERA DE LA COSTA CERCA DE LA VELA	11.46	-69.57		1			
1961	0	2	6.5	COLOMBIA	DEL NORDESTE	8.9	-73.4		1			
1965	1	6		GRANADA	KICK ‘EM JENNY VOLCÁN	12.3	-61.63		0			
1967	4	1	6.6	VENEZUELA	CARACAS	10.559	-67.33	0.08	1		300	140
1967	0	9		TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	COSTA NORTE DE PUERTO RICO				6	2		
1968	2	1	6.5	VENEZUELA	CARUPANO	10.697	-62.748		1		3	
1969	4	1	7.2	GUADALUPE (TERRITORIO FRÁNCES)	GRAN BOURG	15.8	-59.7	0.23	3			
1976	4	1	7.5	GUATEMALA	GUATEMALA	15.324	-89.101	0.12	1		23,000	2,147
1979	2	8	5	VENEZUELA	PUERTO CUMAREBO	11.517	-69.5		1			
1985	4	1	6.4	GUADALUPE (TERRITORIO FRÁNCES)	GUADALUPE	17.013	-62.448	0.12	1			
1989	3	1	4.4	TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	PUERTO RICO	18.986	-68.833	0.1	1			
1991	4	1	7.6	COSTA RICA	LIMON, PANDORA	9.685	-83.073	3	30	2	90	510
1997	3	1	7	VENEZUELA	CARIACO-CUMANA	10.598	-63.486		1		81	81
1997	4	7		MONTSERRAT	VALLE DEL RÍO BLANCO	16.72	-62.18	3	1			
1999	4	6		MONTSERRAT	VOLCÁN SOUFRIERE HILLS	16.722	-62.18	2	3			
2003	4	6		MONTSERRAT	VOLCÁN SOUFRIERE HILLS	16.722	-62.18	4	5			
2004	4	1	6.3	GUADALUPE (TERRITORIO FRÁNCES)	BASSE-TERRE, LES SAINTES	15.679	-61.706	2	9		1	
2005	3	1	5.8	GUADALUPE (TERR. FRÁNCES)	PASAJE DOMINICA	15.775	-61.744		2			
2006	4	6		MONTSERRAT	VOLCÁN SOUFRIERE HILLS	16.722	-62.18	1	4			
2007	1	1	7.4	MARTINICA (TERR. FRÁNCES)	MARTINIQUE	14.944	-61.274		0			
2009	4	1	7.3	HONDURAS	FUERA DE LA COSTA DE HONDURAS	16.72	-86.236	4	2		7	
2010	4	3	7	HAITI	HAITI Y DOMINICAN REPUBLIC	18.457	-72.533	3.21	25	1	316,000	8,000
2017	4	8		COLOMBIA	FUERA DE LA COSTA CERCA DE SAN-TA MARTA	11	-74.3	8	7	1		
2018	4	1	7.5	HONDURAS	FUERA DE LA COSTA DE HONDURAS	17.483	-83.52	0.4	8			
2018	2	1	7.3	VENEZUELA	SUCRE	10.773	-62.902		1		5	
2020	4	1	6.4	TERRITORIO DE ESTADOS UNIDOS	PUERTO RICO	17.916	-66.813	0.06	6		4	800
2020	4	1	7.7	CUBA	FUERA DE LA COSTA SE	19.44	-78.755	0.11	2			
2021	4	1	7.2	HAITI	PUERTO PRINCIPE	18.408	-73.475		3		2,248	1,600

Validez: La validez de la ocurrencia real del tsunami se indica mediante una calificación numérica de los informes de ese evento, valores -1 a 4, -1 (entrada errónea); 0 (perturbación en un río o lago interior); 1 (muy dudoso); 2 (cuestionable); 3 (probable) y 4 (definitivo).

Causa: La fuente del tsunami: Valores válidos de 0 a 11: 0 (desconocida); 1 (terremoto); 2 (terremoto cuestionable); 3 (terremoto y deslizamiento de tierra); 4 (volcán y terremoto); 5 (volcán, terremoto y deslizamiento de tierra); 6 (volcán); 7 (volcán y deslizamiento de tierra); 8 (deslizamiento de tierra); 9 (meteorológico); 10 (explosión) y 11 (marea astronómica).

Run-up: Altura vertical máxima en tierra sobre el nivel del mar alcanzado por un tsunami.

Casas destruidas: Para aquellos evwentos que no ofrecen un número exacto de casas dañadas, se utilizó la siguiente escala de cuatro niveles para clasificar el daño de 0 a 4: 0 (Ninguna); 1 Pocas (1 a 50); 2 Algunas (51 a 100); 3 Muchas (101 a 1,000); 4 Muchísimas (más de 1,000).

Fuente: Elaboración propia con base en NCEI (2023). Natural Hazards. Region 74 – Caribbean Sea. DOI:10.7289/V5PN93H7.

Figura 89. Eventos de Tsunamis Región Mar Caribe (1498 - 2021)



Fuente: https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/

Run up

Ahora bien, como ya se señaló, uno de los puntos de mayor interés en el estudio de los tsunamis es el run-up, que corresponde a la cota máxima de inundación, pues su predicción estima el peligro al cual se ve expuesta la población.

La ecuación para el cálculo de la altura de la ola y la profundidad de la costa es la siguiente:

Run up

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d2}{d1}\right)^{1/4}$$

Donde:

A_1: Amplitud de la ola en la costa

A_2: Amplitud de la ola en el oceáno

$d2$: Profundidad del oceáno

$d1$: Profundidad de la costa

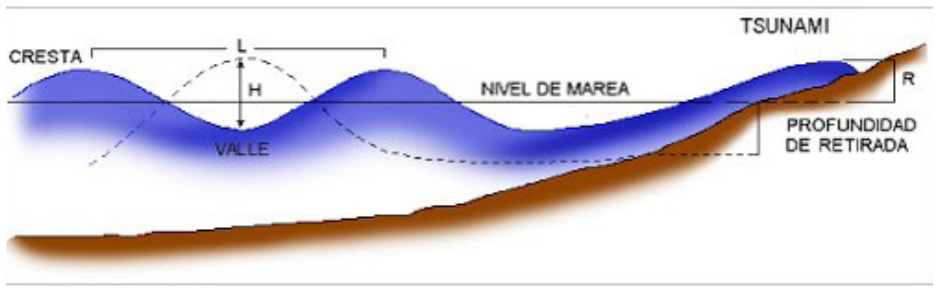
El run-up puede ser definido como:

1. Diferencia entre la elevación de penetración máxima de un tsunami (línea de inundación) y el nivel del mar en el momento del tsunami. En términos prácticos, el run-up es solo la medida donde hay evidencia del límite de la inundación sobre la costa.
2. Elevación alcanzada por el mar medido en relación con algunos niveles fijos tales como el nivel medio del mar, bajamar media, nivel del mar en el momento del tsunami, entre otros, y al a vez idealmente medido, en un punto correspondiente al máximo local de la inundación horizontal.

En los lugares donde la elevación no esta medida con relación a la máxima inundación horizontal, ésta es denominada frecuentemente como la altura de la inundación.

La altura de la ola (H) corresponde a la diferencia de nivel entre cresta y valle. Por otra parte, la cota máxima de inundación R, corresponde al lugar de la costa donde los efectos del tsunami son máximos (figura 8).

Figura 90. Cota de máxima inundación R.



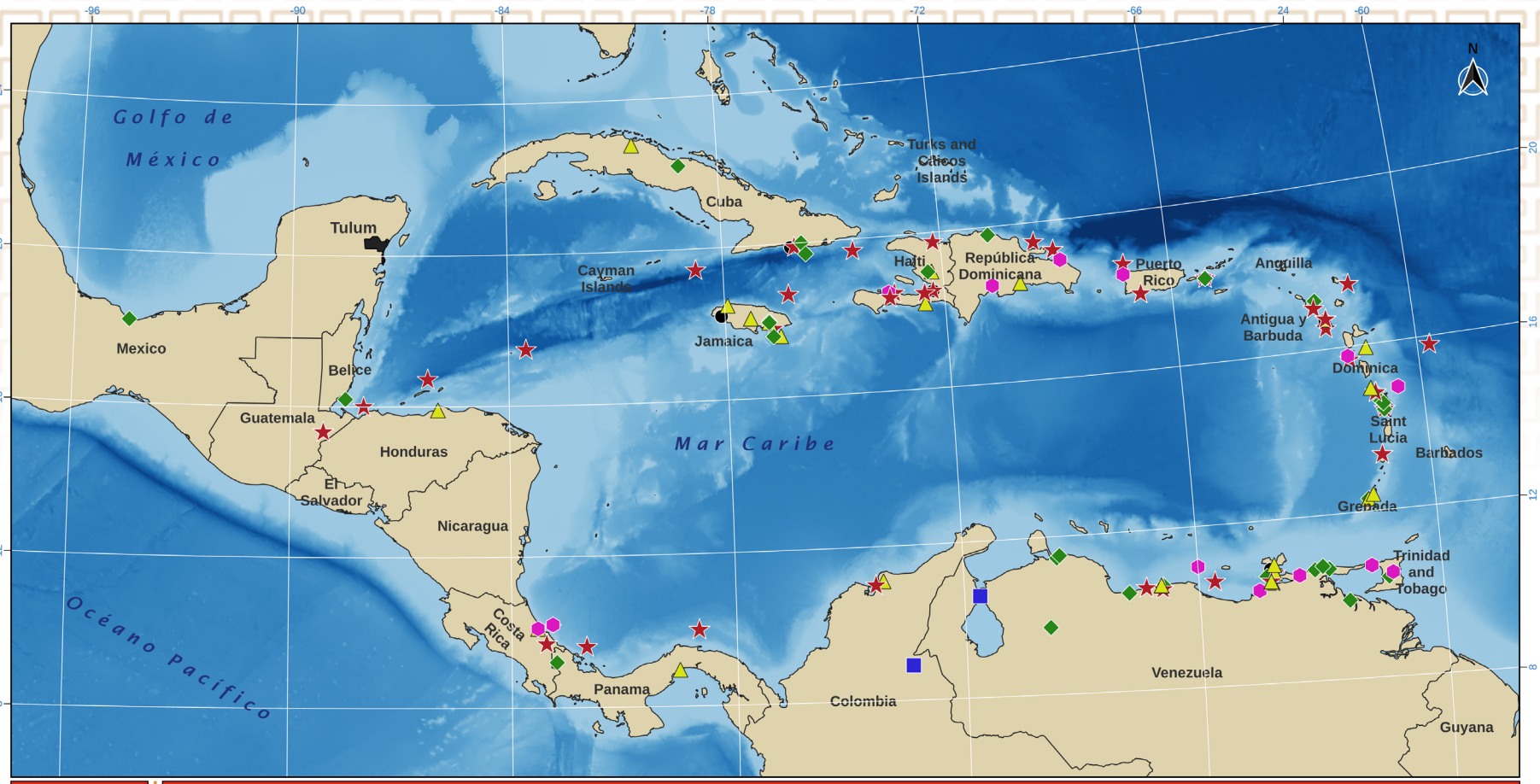
Para el estado de Quintana Roo el “run-up” más reciente detectado a través de mareógrafos se advirtió en 2022 en Isla Mujeres (tabla 79).

Tabla 78. Observación de tsunamis

Nombre del lugar	Altura del agua (m):	Fecha	Distancia al epicentro (km)
ISLA MUJERES	0.08	1/15/2022	10,691
ISLA MUJERES	0.05	8/14/2021	1,420
ISLA MUJERES	0.07	1/10/2018	534
PUERTO MORELOS	0.04	1/15/2022	10,633
PUERTO MORELOS	0.05	8/14/2021	1,429
PUERTO MORELOS	-	1/28/2020	862
PUERTO MORELOS	0.08	1/10/2018	515
SIAN KAAN	0.05	1/10/2018	462

Fuente: Elaboración propia con base en Natural Hazard Viewer (https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/).

Figura 91. Lugares de las costas del Mar Caribe que registraron una altura de recorrido de la propagación de olas (1498 - 2021).



EVENTOS DE TSUNAMI (1498 A 2021)

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Sistema de coordenadas geodésico mundial
(World Geodetic System 1984, WGS84)

Escala: 1 : 11,000,000
0 250 500 750 km

Fuente:
Tsunami data, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2022).
National Centers For Evironmental Information World Data Service for Geophysics.

Elaborado por: CIG

Fecha de elaboración: diciembre 2022

SIMBOLOGÍA

Límites
- Municipio de Tulum
- Países

Validez de Tsunami
- Definitivo
- Probable
- Cuestionable
- Muy dudoso
- Perturbación en río o lago
- Entrada errónea

Año	Nombre	Magnitud	País	Muertes
1868	Rio Caribe	8.5	Venezuela	
1843	Pointe-a-Pitre	8.3	Guadalupe	
1842	Cap-Haitian	8.1	Haiti	300
1690	Antigua; Saint Kitts and Nevis	8	Antigua Y Bermuda	
1946	Northeastern Coast	7.9	República Dominicana	1790
1882	San Blas Archipelago	7.9	Panama	100
1839	Martinique	7.8	Martinica	
1900	Mancuto	7.7	Venezuela	
1692	Port Royal	7.7	Jamaica	2000

Fuente: Natural Hazard Viewer (NCEI, 2023) https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/

Ahora bien, y siguiendo el ejemplo de Welti, (2005), supongamos que queremos calcular el run-up para una profundidad del océano de d2= 5,000 m con una profundidad de la costa de d1=5m, el cociente tiene un valor de 1,000 y su raíz cuarta es 5.6, esto indica que la altura del tsunami en el litoral crecerá casi 6 veces, entonces si el tsunami, por ejemplo, tiene una altura de 2m en el mar, se convertirá en una de casi 12m en la costa.

Calculando esta estimación para el municipio de Tulum, quedaría de la siguiente manera, siguiendo esta metodología:

Evento	Lugar	Profundidad
Terremoto	Mar Caribe	2,200m (d2)
	Costa Tulum	25m (d1)
	run-up	3.1
Ola	**Altura en el mar (m)**	**Altura en la costa (m)**
	2	6
	3	9
	4	12

Lo anterior, indica que la altura de un tsunami crecerá 3 veces, tomando 25m como la profundidad de la costa del municipio de Tulum, es decir, si la altura de la ola del tsunami tiene 2m en el mar, se convertirá en una ola de 6m en el litoral de costa del municipio de Tulum, aproximadamente, y así sucesivamente.

Se debe tener en cuenta las variaciones en las formas y las pendientes de la batimetría submarina cercana a la línea de costa, que influyen directamente en el potencial de energía del tsunami, ocurriendo amplificación o atenuación de las ondas.

Es posible trazar cartas de propagación de tsunamis, como se hace con las cartas de olas; la diferencia es que los tsunamis son refractados en todas partes por las variaciones de profundidad; mientras que con las olas ocurre sólo cerca de la costa (figura 92 y 93).

Entre los eventos de tsunamis más significativos, originados a partir de un sismo, que se extendieron hacia las costas de la Península de Yucatán, de acuerdo con los datos de la NOOA (National Oceanic and Atmospheric Administration) se encuentran:

- 10 de noviembre de 1918 con origen en Puerto Rico (figura 92)
- 12 de enero de 2010 con origen en Haití (figura 93).

Sin embargo, ninguno de estos eventos tuvo consecuencias significativas para el estado y el municipio de Tulum. En las figuras 92 y 93 se pueden apreciar el tiempo de propagación en horas.

Figura 92. Tiempo de propagación de tsunami con origen en Puerto Rico (1918/10/11).



Fuente: NOAA -National Centers for Environmental Information - Natural Hazards Viewer (https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/).

Figura 93. Tiempo de propagación horas de tsunami con origen en Haití (2010/1/12).

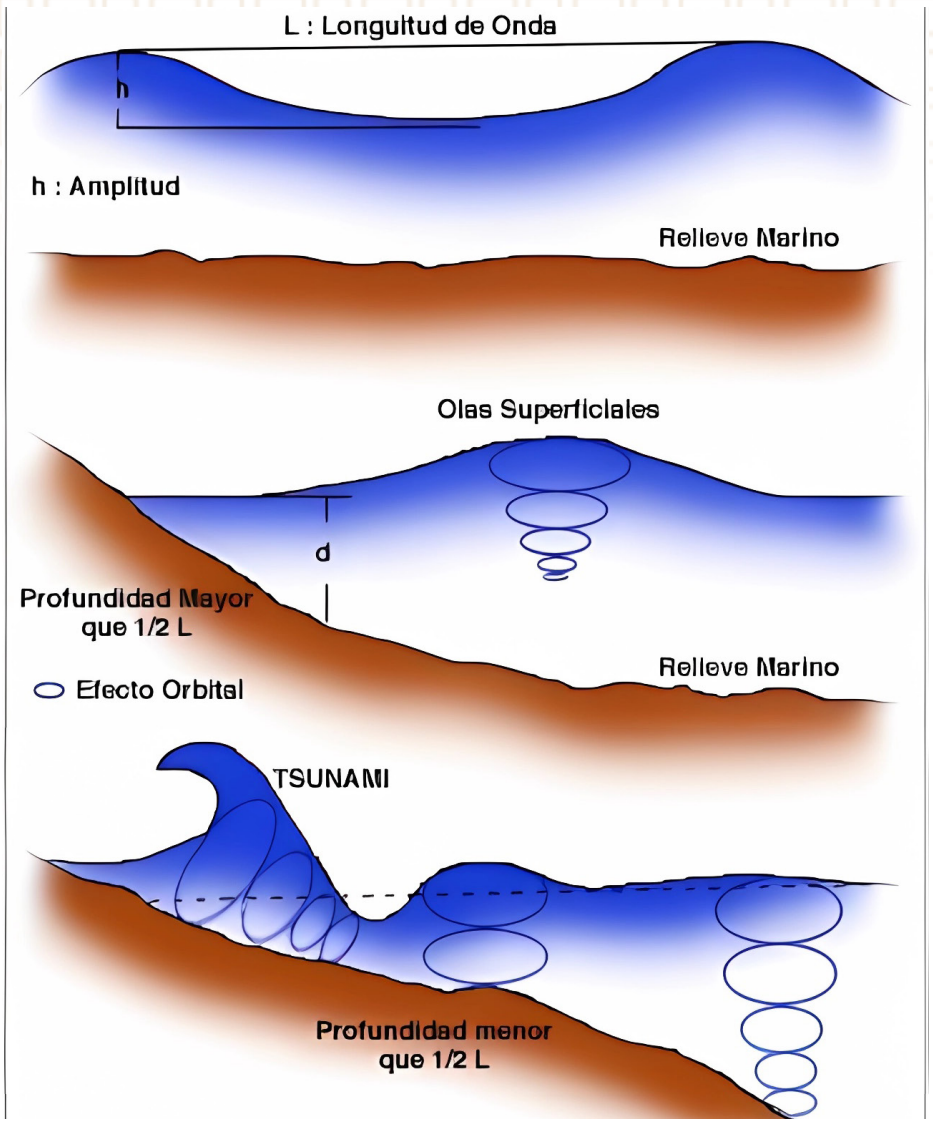


Fuente: NOAA - National Centers for Environmental Information - Natural Hazards Viewer (https://www.ncei.noaa.gov/maps/hazards/).

Longitud de onda

Los tsunamis tienen normalmente longitudes de onda que superan los 50 kilómetros y pueden alcanzar hasta 1,000 kilómetros, en tal caso el efecto orbital es constante y vigoroso en cualquier parte del fondo marino, ya que no existen profundidades semejantes en los océanos (figura 94).

Figura 94. Parámetros físicos y geométricos de la onda de tsunami.



Fuente: Ramírez, 1986.

El desplazamiento de un tsunami a grandes profundidades se manifiesta en la superficie oceánica con amplitudes tan solo de unos pocos centímetros.

La longitud de onda de un tsunami corresponde al producto entre la velocidad de propagación y el período de tiempo, relación dada por:

Longitud de onda

$$L = VxT$$

Donde:

L: Longitud de onda

V: Velocidad de propagación

T: Periódo o tiempo

De este modo, para una velocidad de propagación (V) de 713 km/h, y un período (T) de 15 minutos, la longitud de onda (L) sería de 178 km.

Por otro lado, las olas generadas por los vientos tienen períodos por lo general de menos de 15 segundos, a diferencia de las ondas de tsunami que oscilan entre 20 y 60 minutos. Esta característica permite diferenciarlas claramente en un registro mareográfico, y por lo tanto, advertir la presencia de un tsunami (tabla 80). Un mareográfo es el instrumento utilizado para medir el nivel del mar, conocido también como medidor de marea. Mide la altura (ascenso y descenso) de la marea realizando un registro gráfico y continuo de la altura de la marea en el tiempo.

Tabla 79. Diferencias entre olas de tsunamis y olas comunes.

CARACTERÍSTICA	OLA TSUNAMI	OLA COMÚN
De 150 a 100 Km	Longitud de onda	90 m O. Atlántico
		300 m O. Pacífico
Velocidad máxima	900 km/hr y más	< 100 km/hr
Período	De 10 a 90 min.	< 15 seg.
Altura o amplitud	Pocos centímetros	
Mar adentro	1-30 m	< 13 m
Costa		6 m
Influencia en el fondo	Perturba totalmente el fondo	Ninguna, sólo en la playa

Fuente: Ramírez, 1986.

5.1.3.2. Resultado análisis

Cabe destacar que para hacer una simulación de tsunamis para el municipio de Tulum con fines de prevención es necesario contar con una mejor resolución batimétrica, así como conocer todos los parámetros focales de la fuente generadora del tsunami. Sin embargo, de acuerdo con los modelos batimétricos generados (mapas batimétricos ciudad y mpio figuras 95 y 96) se estimó una tabla de la velocidad de propagación de una posible amenaza de tsunami para la costa del municipio y ciudad de Tulum (tablas 81 y 82)

Si recordamos que, si la profundidad de las aguas disminuye, la velocidad del tsunami decrece.

Para el cálculo de los parámetros antes mencionados, se inicio con el de Velocidad de Propagación (VP) donde se correlaciona con la profundidad del fondo marino y la gravedad (tabla 80). La longitud de onda (L) de un tsunami es el producto de esta VP por el periodo de tiempo (tabla x). Debido a la longitud de onda, el desplazamiento de un tsunami a grandes profundidades seria apenas de unos pocos centímetros.

Para estimar, la altura de la ola se asume la profundidad del Mar Caribe (2,200m) y de ahí los diferentes valores de la profundidad de la costa del municipio de Tulum, posterior se calcula cual sería la altura de la ola en el mar, suponiendo que la ola alcance una altura de 2 o 3 metros cercana al centro del origen del tsunami en el litoral esta crecerá de 2.4 a 4.8 m dependiendo de la profundidad de la costa (tabla 80). Es decir, si el tsunami tiene una altura de 3 metros en el mar, se puede convertir en una ola de casi 5 metros en el litoral.

Tabla 80. Velocidad de propagación, longitud de onda y altura de ola tsunami en función profundidad de la costa del municipio de Tulum

Profundidad costa (m)	Velocidad de propagación (VP)		Longitud de onda (L)		Lugar del evento		Altura de ola (h)	
	(km/h)	m/s	Tiempo (minutos)	L (km)	Profundidad del Mar Caribe (m)	Run up	Altura en el mar (m)	Altura en la costa (m)
100	113	31	15	28	2200	2.2	2	4.3
90	107	30	20	36	2100	2.2	2	4.4
80	101	28	25	42	2000	2.2	2	4.5
70	94	26	30	47	1900	2.3	2	4.6
60	87	24	35	51	1800	2.3	2	4.7
50	80	22	40	53	1700	2.4	3	7.2
40	71	20	45	53	1600	2.5	3	7.5
30	62	17	50	51	1500	2.7	3	8
20	50	14	55	46	1400	2.9	3	8.7
10	36	10	60	36	1300	3.4	3	10.1

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la velocidad de propagación depende del relieve oceánico (ósea de su profundidad). Los periodos de tiempo de los tsunamis van de unos pocos minutos a una hora. La energía del tsunami depende más del área del levantamiento vertical del agua. El poder destructivo del tsunami esta ligado más a su longitud de onda que a su altura. Una ola de 10m de altura, pero de corta longitud de onda produce menos daño que un tsunami de pocos metros de altura, pero de una longitud de altura más importante. La diferencia, para una misma altura de ola, es la cantidad de agua que le sigue atrás.

Para simular el comportamiento de la amenaza de tsunami en la costa cercana a la ciudad de Tulum, más específicamente de su zona hotelera, se realizaron los cálculos para profundidades menores, es decir, profundidades cercanas al litoral, y así poder representar los posibles niveles de inundación de acuerdo con la altura que alcanzaría de la ola en la costa cercana (tabla 82).

Tabla 81. Velocidad de propagación, longitud de onda y altura de ola tsunami en función profundidad del litoral de para la ciudad de Tulum

Profundidad costa (m)	Velocidad de propagación (VP)		Longitud de onda (L)		Lugar del evento		Altura de ola (h)	
	(km/h)	m/s	Tiempo (minutos)	L (km)	Profundidad del Mar Caribe (m)	Run up	Altura en el mar (m)	Altura en la costa (m)
1100	374	104	15	93	2200	1.2	2	2.4
1000	357	99	20	119	2100	1.2	2	2.4
900	338	94	25	141	2000	1.2	2	2.4
800	319	89	30	159	1900	1.2	2	2.5
700	298	83	35	174	1800	1.3	2	2.5
600	276	77	40	184	1700	1.3	3	3.9
500	252	70	45	189	1600	1.3	3	4
400	226	63	50	188	1500	1.4	3	4.2
300	195	54	55	179	1400	1.5	3	4.4
200	159	44	60	159	1300	1.6	3	4.8

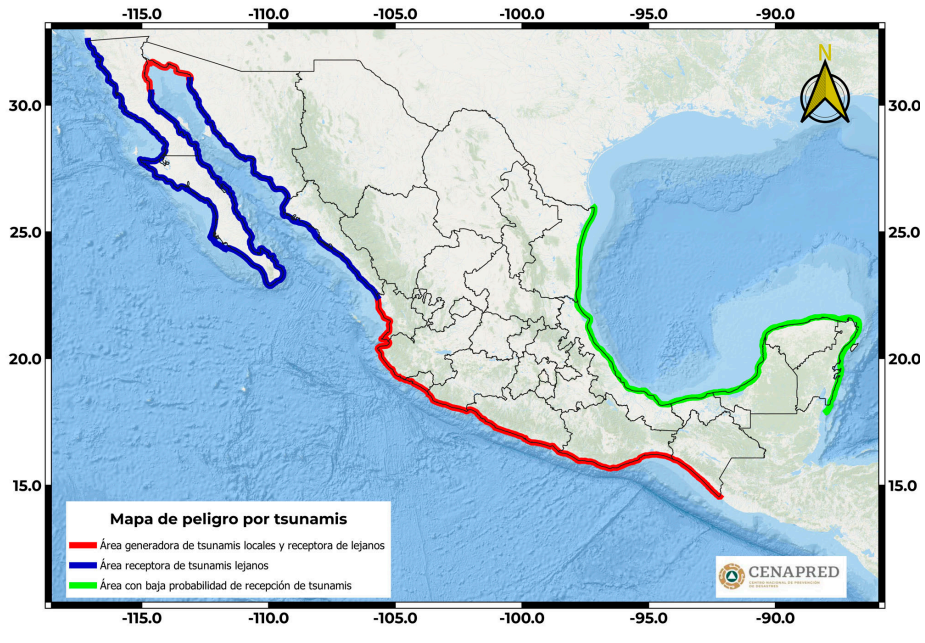
Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha comentado, el tsunami viaja más lento cuando menor es la profundidad del agua (tabla 82). En altamar el tsunami puede alcanzar velocidades como las de un avión (900 km/h aproximadamente) y disminuye cuando conforme se acerca a la costa (36 km/h). La distancia entre sus olas en altamar puede ser 20km a 300km y cercana a la costa solo de decenas. Puede alcanzar la costa en intervalos regulares variables entre 5 y 60 minutos. Estas oscilaciones pueden durar desde varias horas hasta días, dependiendo del tamaño del tsunami (IGN, 2021).

Un tsunami mayor que en alta mar tenga una altura de ola de 1 metro, puede llegar a tener decenas de metros en aguas someras. Esto hace que en general un tsunami pase inadvertido y no provoque daños a los barcos que están en alta mar y, en cambio, llegue a alcanzar grandes alturas (8 metros, por ejemplo) causando graves daños en la costa.

Ambos cálculos muestran la manera que se puede comportar los factores físicos que componen la amenaza de tsunami para el municipio de Tulum, los cuales pueden servir para el procesamiento y sistematización de datos si el fenómeno llega a presentarse. No obstante, la amenaza de tsunami para el municipio de Tulum es baja, parte de la razón es la falta de zonas de subducción, ya que es el origen general de este peligro es a causa de terremotos submarinos. Las zonas de subducción en la cuenca del Atlántico están sólo a lo largo del borde oriental de la Placa del Caribe y en el borde oriental de la Placa de Scotia en el Atlántico Sur (referir figura de placas). Estas zonas de subducción son pequeñas, no son excepcionalmente activas y explican el porqué de la baja incidencia de tsunamis generados por un terremoto.

Tabla 82. Peligro de tsunamis en México



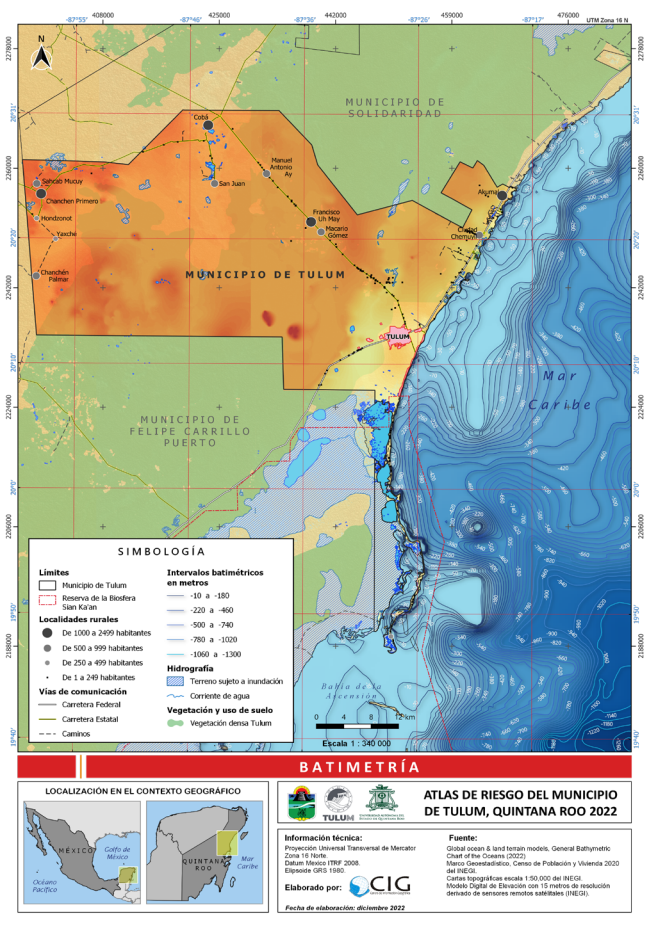
Fuente: CENAPRED (2019).

El mismo CENAPRED (2019) señala que la gran mayoría de los tsunamis son una consecuencia de los sismos que ocurren en regímenes tectónicos de subducción que se encuentran en el fondo oceánico, siendo en el Océano Pacífico donde se presentan mayormente, especificando al Océano Atlántico como una zona de baja probabilidad de recepción de tsunamis en el territorio mexicano (figura 83).

5.1.3.3. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados

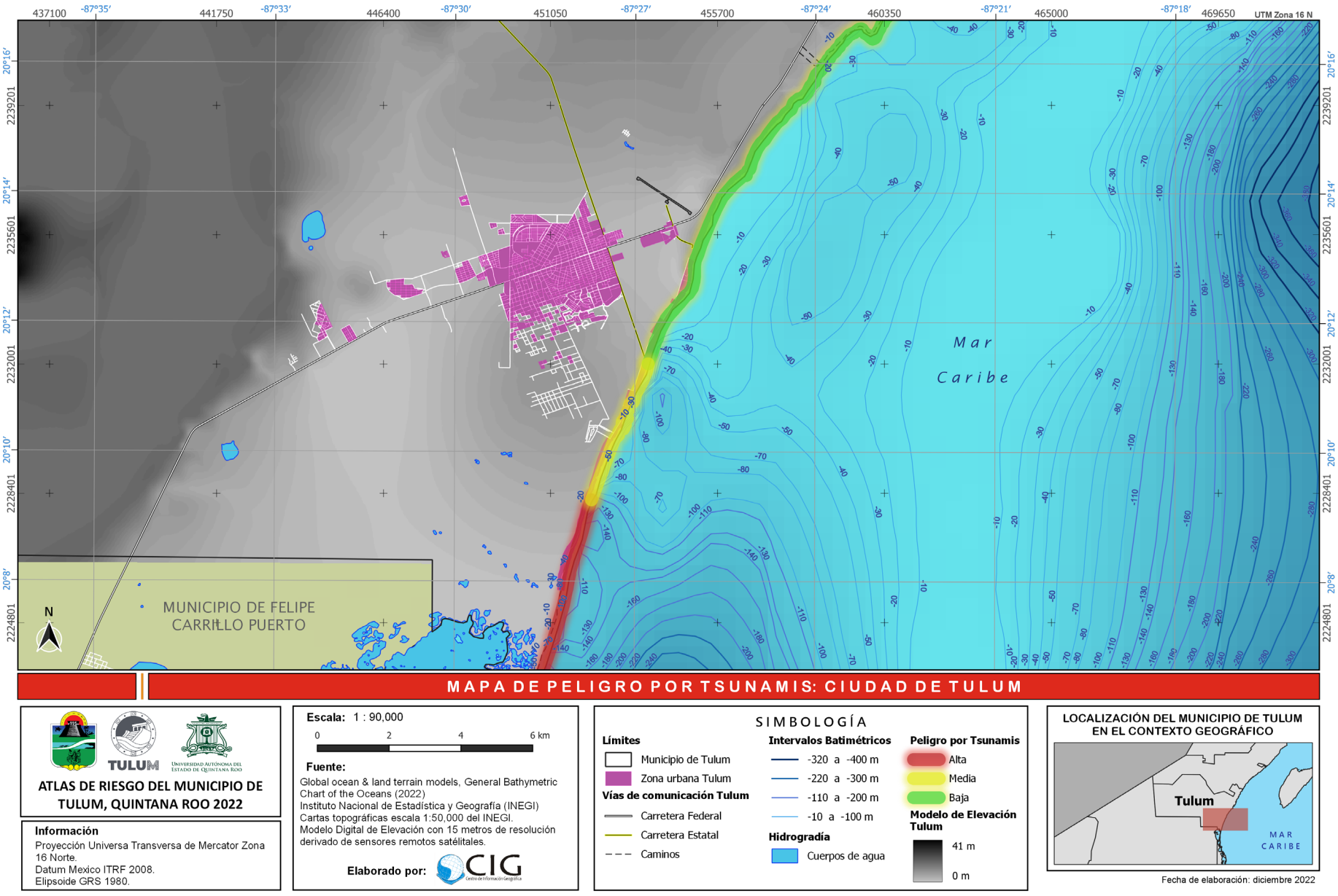
Los mapas 95 y 96 representan los datos batimétricos correspondientes a las costas del municipio de Tulum y al litoral de la ciudad de Tulum con énfasis en los grados de peligro si esta amenaza llegase a presentarse su zona hotelera. Los datos batimétricos se obtuvieron de GEBCO Gridded Bathymetry Data Download (https://download.gebco.net/). El conjunto de datos batimétricos cuadriculados actual de GEBCO, GEBCO_2022 Grid, es un modelo de terreno global para el océano y la tierra, que proporciona datos de elevación, en metros, en una cuadrícula de intervalo de 15 segundos de arco (un arco de segundo equivale aproximadamente a 30m). Permite descargar datos en formato GeoTiff con cobertura global.

Figura 95. Mapa de batimetria de la costa de Tulum



Fuente: Elaboración propia con base en General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2022): https://download.gebco.net/

Figura 96. Peligro por Tsunamis en la costa de Tulum



Fuente: Elaboración propia con base en General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 2022): https://download.gebco.net/

En un sistema de alerta, para poder avisar a tiempo a la población de la llegada de un tsunami cuya generación ya se haya confirmado, estas cartas constituyen un recurso muy útil.

Actualmente el Centro de Alerta de Tsunami del Pacífico (PTWC, por sus siglas en inglés) con sede en Hawái emite las alertas de tsunamis para los países del Pacifico, desde 1960. Rusia también cuanta con un centro de alerta de tsunamis para eventos cercanos, que posteriormente derivaron en otros dos centros que participaban en el de Naciones Unidas del Pacífico para tsunamis lejanos.

Por otro lado, Francia creó el Centro de Alerta de Tsunamis de la Polinesia, zona principalmente afectada por tsunamis lejanos. Este centro de alerta siguió la misma metodología que el PTWC, con el que colaboraba monitorizando el nivel del mar y la sismicidad.

Después del tsunami de 2004 en Sumatra, la comunidad internacional encomendó a la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO coordinar la creación de un sistema de alertas en el océano Índico. En su 23ª reunión (21–30 de junio de 2005), la Asamblea de la COI decidió oficialmente crear el Grupo Intergubernamental de Coordinación del Sistema de Alerta contra los Tsunamis y Atenuación de sus Efectos en el Océano Índico (ICG/IOTWMS), en el Atlántico Nororiental y el Mediterráneo y Mares Adyacentes (ICG/NEAMTWS) y el ICG contra los Tsunamis y otras Amenazas Costeras en el Caribe y Regiones Adyacentes (ICG/CARIBE-EWS).

Con la creación de los distintos centros de alerta en estos mares se consigue información necesaria para todos los posibles países afectados por un tsunami.

Los sistemas de alerta de tsunami están basados principalmente en redes de sismómetros y estaciones de medición del nivel del mar que envían datos en tiempo real a los centros de alerta nacionales y regionales. El análisis de estas observaciones permite a los centros confirmar o revocar una alerta o aviso de tsunami.

En 1995 la Agencia Oceánica y Atmosférica Nacional de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) desarrolló un nuevo sistema de detección en alta mar utilizando unas boyas de información y evaluación de tsunamis en el fondo marino, denominadas DART por su acrónimo inglés. Estas boyas reciben los datos de un sensor de presión instalado en el fondo marino el cual es capaz de detectar incluso un pequeño tsunami que pase sobre él.

Otro novedoso sistema de detección que está desarrollando Japón se basa en colocar estaciones sísmicas en el fondo del mar unidas mediante cables de fibra óptica.

Cuando se detecta un tsunami potencialmente destructivo, las autoridades nacionales de cada país han de decidir si procede emitir una alerta pública de tsunami y una orden de evacuación.

Finalmente, la magnitud de los efectos de un tsunami en áreas costeras va a depender de una serie de factores físicos y de la existencia o no de poblaciones. La llegada de un tsunami a las costas se manifiesta por un cambio anómalo en el nivel del mar, generalmente se presenta un aumento o recogimiento previo de las aguas; esta última situación suele dejar descubiertas grandes extensiones del fondo marino. Posteriormente, se produce una sucesión rápida y acentuada de ascensos y descensos del nivel de las aguas, cuya altura puede variar entre uno y cuatro metros; sin embargo, se han registrado casos puntuales en que las olas alcanzaron alturas superiores a los 20 metros.

5.1.4. Inestabilidad de laderas

5.1.4.1. Metodología

De acuerdo a Terzagui (1950, cit. CENAPRED, 2021), la estabilidad general de una ladera depende de factores internos y externos, y su análisis se realiza a partir de la definición de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes.

Por su parte, González de Vallejo, et al. (2002), los factores condicionantes para este peligro son los que dependen de su propia naturaleza, estructura y forma de terreno (tabla 84). Por otra parte, también se encuentran los factores desencadenantes, es decir, factores externos que provocan o desencadenan la inestabilidad de laderas (tabla 84), los cuales pueden ser:

Tabla 83. Factores influyentes en la estabilidad de laderas

Factores condicionantes (internos)	Factores desencadenantes (externos)
Estratigrafía y Litología	Sobrecargas estáticas (peso de estructuras o edificios, u otro tipo de cargas como rellenos, escombreras, paso de vehículos pesados)
Estructura geologica (discontinuidades del terreno)	Cargas dinámicas (movimientos sísmicos, naturales o inducidos, y a las vibraciones producidas por voladuras cercanas a la ladera)
Condiciones hidrogeológicas y comporta-miento hidrogeológico de los materiales (presiones intersticiales, arrastres y erosión, superficial o interna)	Cambios en las condiciones hidrogeológicas (precipitaciones y acciones antrópicas, cuando se realizan excavaciones inadecuadas sin criterios geotécnicos)
Propiedades físicas, resistentes y deforma-cionales	Factores climáticos (lluvia, sequía, sismos, actividad volcánica)
Tensiones naturales y estado tenso-deforma-cional (explotaciones mineras y excavaciones profundas 50 m o más)	Variaciones en la geometría
	Reducción de parámetros resistentes (actividad humana: sobrecargas, fugas de agua, uso de suelo)

Fuente: Elaborado con base en González de Vallejo, et al (2002).

Asimismo, como ya se ha mencionado la susceptabilidad de laderas depende de las propiedades del terreno (los factores internos), las cuales indican que tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que pueda ocurrir la inestabilidad, se refiere solamente a los materiales naturales de la ladera, sin considerar factores desencadenantes (factores externos), como sería el caso de la precipitación o la sismicidad.

Se propone para el municipio de Tulum, como en otros intrumentos de planeación (Atlas de Riesgo para municipios de Benito Juárez y Felipe Carrillo Puerto), una metodología para estimar cualitativamente la amenaza de deslizamiento de laderas, apoyada en la asignación de valores numéricos a cada uno de los factores influyentes, según sus atributos. Esta metodología empírica es de naturaleza cualitativa y está basada en la metodología propuesta por Suárez (1998) y modificada por Moral (2014), incorporando a la anterior modificaciones y criterios más amplios a la hora de estudiar los factores de susceptibilidad en el municipio.

Este procedimiento se basa en la asignación de valores numéricos a cada uno de los factores condicionantes según sus propiedades. Tales factores reúnen aspectos topográficos, geotécnicos, históricos, geomorfológicos y ambientales (tablas 85, 86 y 87) . Estos datos se despliegan en las tablas indicadas para poder hacer el cálculo de la calificación para cada indicador correspondiente. Posteriormente, en función de la suma total de las calificaciones asignadas, se establecen cinco grados para la amenaza de deslizamiento de laderas, desde muy baja hasta muy alta (tabla 88). No obstante, los valores obtenidos solo deben considerarse indicativos y deberan revisarse periodicamente.

Tabla 84. Factores topográficos e históricos.

FORMATO PARA LA EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS 1. FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS						
Factor	Categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación zonas		
				A	B	C
Inclinación de los taludes (pendiente)	Más de 45°	2.0	Estimar el valor medio.			
	35° a 45°	1.8				
	25° a 35°	1.4				
	15° a 25°	1.0				
	Menos de 15°	0.5				
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre corona o fondo de la cañada.			
	50 a 100 m	1.2				
	100 a 200 m	1.6				
	Más de 200 m	2.0				
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	No se sabe	0.3	Reseñas verosímiles de lugareños.			
	Algunos someros	0.4				
	Sí, incluso con fechas	0.6				

Fuente: Suárez J., (1998) y Moral, L. (2014).

Tabla 85. Factores geológicos y geotécnicos

2. FACTORES GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS						
Factor	Categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación zonas		
				A	B	C
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.	1.5 a 2.5	Vulnerable a la erosión; o suelos de consistencia blanda.			
	Rocas metamórficas y poco a muy intemperizadas.	1.2 a 2.0				
	Suelos arcillosos consistentes o arenosos limosos compactos	0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado			
	Rocas sedimentarias (calizas, areniscas, conglomerdos, etc.)	0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5 según el grado de meteori-zación.			
	Rocas ígneas sanas (granito, basalto, riolita, tobas, etc.)	0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 a 4 según el grado de meteorización.			
Espesor de la capa de suelo	Menos de 5 m	0.5	Revísense cortes y cañadas; o bien, recúrrase a exploración manual.			
	5 a 10 m	1.0				
	10 a 15 m	1.4				
	15 a 20 m	1.8				

Fuente: Suárez J., (1998) y Moral, L. (2014).

Tabla 86. Factores geomorfológicos y ambientales.

3. FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES						
Factor	Categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación zonas		
				A	B	C
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Inexistentes	0.0	Formas de conchas o de embudo (flujos).			
	Volumenes moderados	0.5				
	Grandes volumenes faltantes	1.0				
Vegetación y uso de suelo	Zona urbana	2.0	Considérese no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.			
	Cultivos anuales	1.5				
	Vegetación intensa	0.0				
	Vegetación moderada	0.8				
	Área deforestada	2.0				
Régimen del agua en la ladera	Nivel freático super-ficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.			
	Nivel freático inexis-tente	0.0				
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1.0				

Fuente: Suárez J., (1998) y Moral, L. (2014).

Tabla 87. Grados de peligro para el deslizamiento de laderas

ESCALA DE VALORES DE LA ESTIMACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD			
Estratificación de la amenaza			Suma de Calificaciones
5	Muy alta		Más de 100
4	Alta		85 a 100
3	Media		70 a 85
2	Baja		50 a 70
1	Muy baja		Menos de 50

Fuente: Suárez J., (1998) y Moral, L. (2014).

5.1.4.2. Memoria de cálculo

Cálculo de la susceptibilidad de laderas para el municipio de Tulum

Se llevó a cabo una serie de geoprocesos para este análisis, con base en las metodologías de Suárez (1998) y Moral (2014), que consistió en la combinación de capas de información para obtener los parámetros a medir. Asimismo, se contó con la información histórica proporcionada por el personal de la Dirección de Protección Civil del municipio.

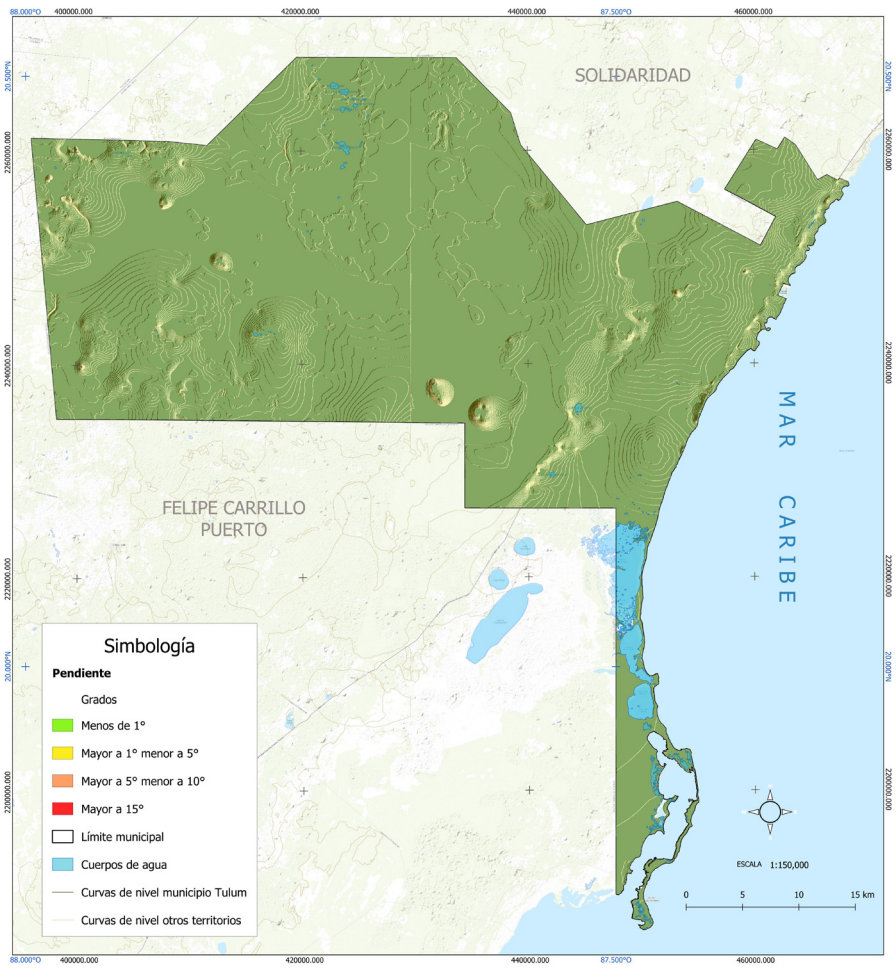
FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS

Para representar la topografía del terreno del municipio de Tulum se obtuvo del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) – INEGI el Modelo Digital del Terreno (MDT) o Modelo Digital de Elevación (MDE). A partir de este modelo se crearon diferentes capas de información para su utilización en posteriores análisis.

Pendiente

La pendiente del terreno identifica el gradiente o tasa de cambio en el valor z desde cada celda de la superficie del modelo raster a partir de los ocho vecinos más próximos de la celda central (3 x 3). El rango de valores en la salida depende del tipo de unidades de medida. En este caso la pendiente calculada se expresa en grados. Posteriormente, se reclasifican estos valores para obtener el primer indicador "inclinación del talud" (tabla 85) de acuerdo con estas 5 categorías: 1) menos de 15°; 2) 15° a 25°; 3) 25° a 35°; 4) 35° a 45° y 5) más de 45° a las cuales les corresponde los pesos relativos de 0.5, 1.0, 1.4, 1.8, y 2.0 respectivamente (tabla 33). La mayor inclinación de la pendiente se encuentra en un rango de 14.5°, ya que todo el territorio municipal es llano con muy poca altitud como se puede observar en la figura 97. En su mayoría la pendiente no sobrepasa los 5° (en líneas amarillas), son mínimos los puntos que superan los 15°, estos se localizan en los montículos que se observan al Sur y Este del territorio municipal.

Figura 97. Mapa de pendientes municipio de Tulum



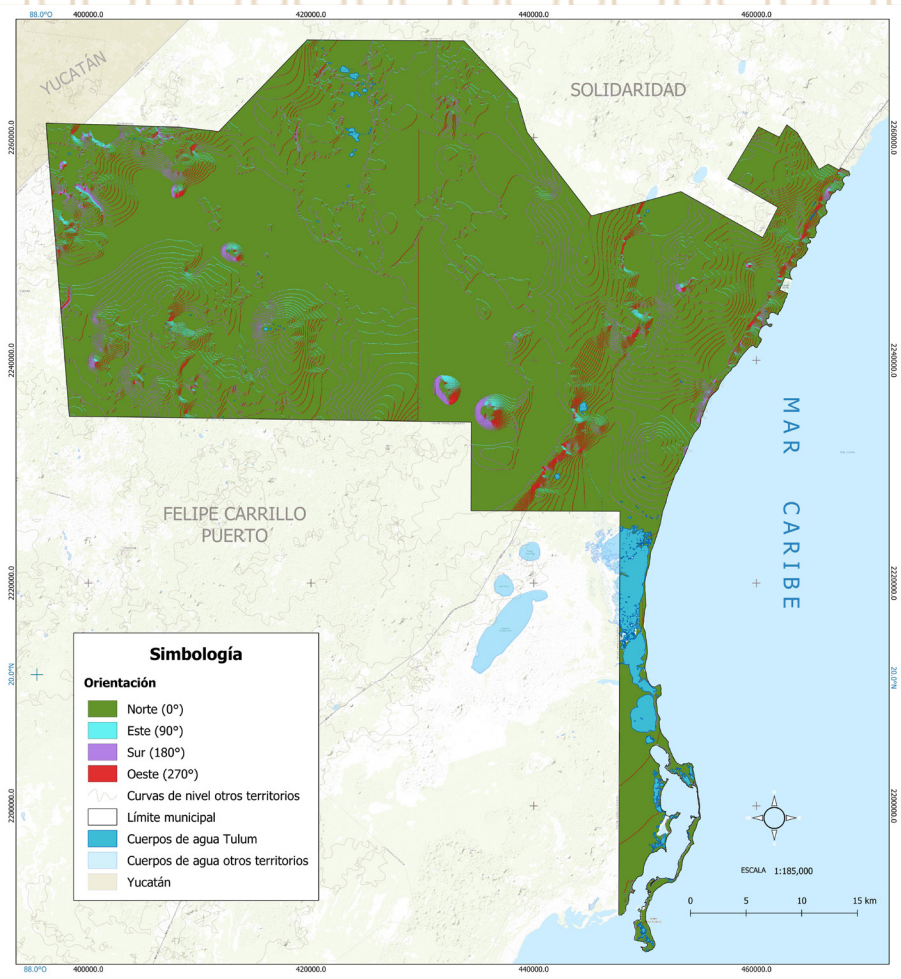
Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI).

Orientación

A través de procesos geoespaciales con imágenes de satélite, específicamente del Modelo Digital de Elevación (DEM), se obtiene una capa ráster que visualiza simultáneamente la orientación y la pendiente de una superficie. La orientación puede pensarse como la dirección de la pendiente. Los valores del ráster de salida serán la dirección de brújula de la orientación, representada por un tono (color). Se representa Se en grados positivos de 0° a 360°, medido en sentido horario desde el norte. Es decir, una orientación a 0° significa que la pendiente está orientada al Norte, de 90° orientada al Este, 180° orientada al Sur y 270° orientada al Oeste, lo que significa que identifica la dirección de pendiente descendente de la tasa máxima de cambio en el valor de cada celda a sus vecinas. La orientación se puede considerar como la dirección de la pendiente.

Para el municipio de Tulum la orientación se encuentra mayoritariamente al Norte con mínima pendiente, a lo sumo variaciones poco significativas (figura 98), ya que más del 80% del territorio se podría afirmar que es una planicie, sin embargo, sobre salen algunas orientaciones de pendiente a 270° en rojo (al Oeste), al Este (90°) y al Sur (180°). Estos cambios se observan al Suroeste y al Este de la región. A partir de este factor y la altura de la ladera (figura 99) se obtiene el desnivel de laderas para prevenir posibles deslizamientos de rocas o de agua.

Figura 98. Mapa de orientación de laderas del municipio de Tulum



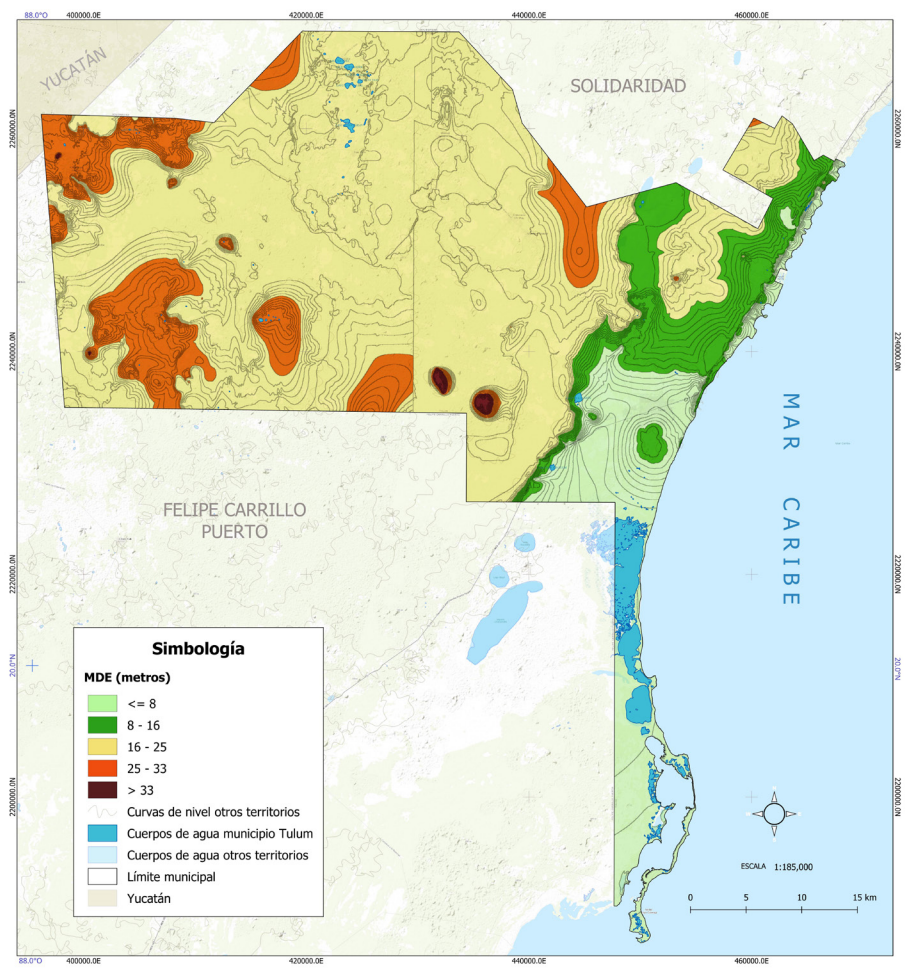
Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI).

Altitud (elevación)

Se muestran las alturas del terreno a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 – INEGI, con tamaño de celdas de 15m, representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z).

A partir de este Modelo Digital de Elevación (MDE) se identifican desniveles del terreno o el fondo de las hondonadas de Tulum. La zona de estudio tiene una altura máxima de 41 m, localizada en su parte sureste colindando con el municipio de Felipe Carrillo Puerto (figura 99), de la misma manera existen partes muy bajas cercanas al Mar Caribe menores o iguales a 8 metros identificadas con el color verde claro (figura 99). Y una zona también cercana a la costa con altitudes entre 8 y 16 metros. Además, se identifican áreas con altitudes entre los 25 y 33 metros representadas en tonos naranjas en el figura 99. Siendo una zona de planicie cuenta con un promedio de altura aproximada de 18.5 metros.

Figura 99. Mapa de Altitud del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia a partir del Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI).

FACTORES GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

Tipos de rocas y suelo

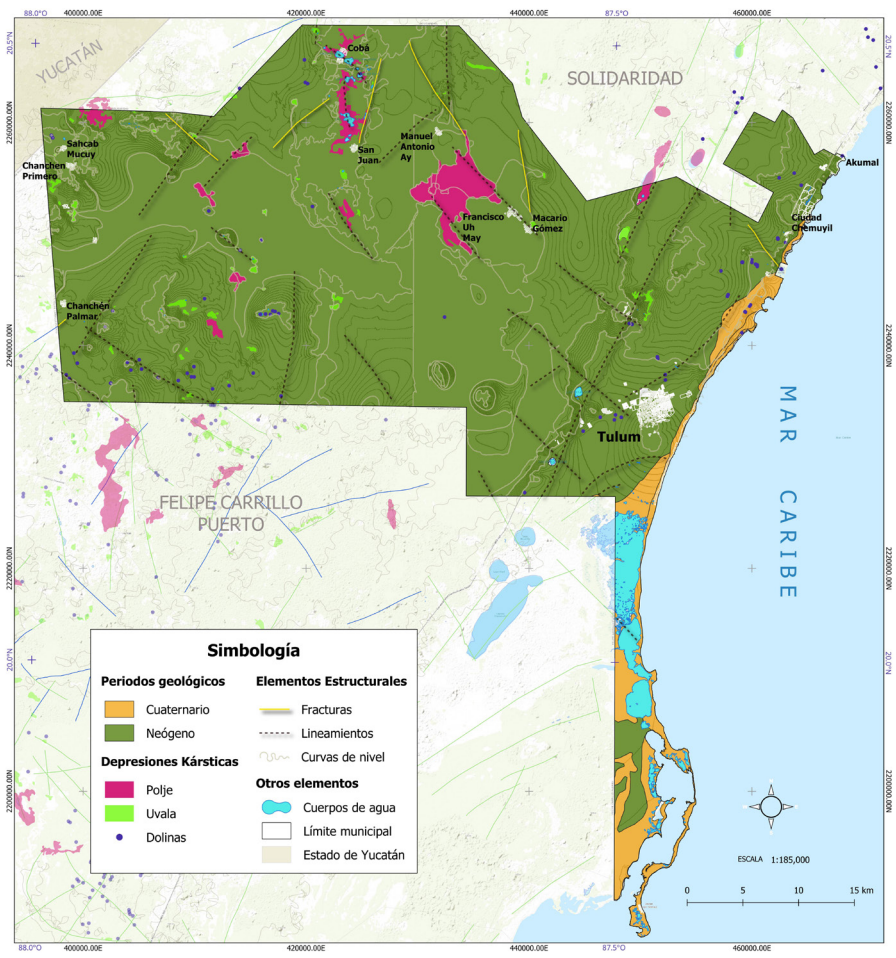
En función del proceso de formación de la roca predominante en el municipio de Tulum se pone de manifiesto que el territorio tiene su origen en el Cenozoico entre los periodos Cuaternario y Neógeno, entre las épocas Holoceno, Pleistoceno, Mioceno, Eoceno y Plioceno, con características de rocas sedimentarias las cuales se han formado a partir de la sedimentación de otras rocas o restos orgánicos, dando lugar a depósitos de areniscas, calizas-coquinas, así como lagunares y litorales (figura 100, figura 101 y tabla 89). Las calizas se encuentran en diferentes formaciones como paramos calizos dando lugar a formas tipo dolinas kársticas y cenotes. El tipo de roca caliza-coquina se encuentra en el 95.2% del total del territorio municipal, las cuales están formadas por carbonatos de calcio y magnesio y de conchas, le siguen rocas más antiguas que son también de origen sedimentario y fueron depositadas en ambientes lagunares y marinos, como los litorales, y, por último, encontramos areniscas, las cuales también son rocas sedimentarias clásticas, principalmente compuestas de partículas pequeñas de cuarzo (clastos).

Tabla 88. Formación de unidades litológicas del municipio de Tulum

Era	Periodo	Edad Inicial	Edad Final	Litología
Cenozoica	Cuaternario	Holoceno	Holoceno	Lagunar Litoral
	Neógeno	Pleistoceno	Pleistoceno	Arenisca
		Mioceno	Plioceno	Caliza-Coquina

Fuente: Elaboración propia con base en las Cartas Geológicas INEGI (2019).

Figura 100. Mapa de Periodos geológicos municipio de Tulum

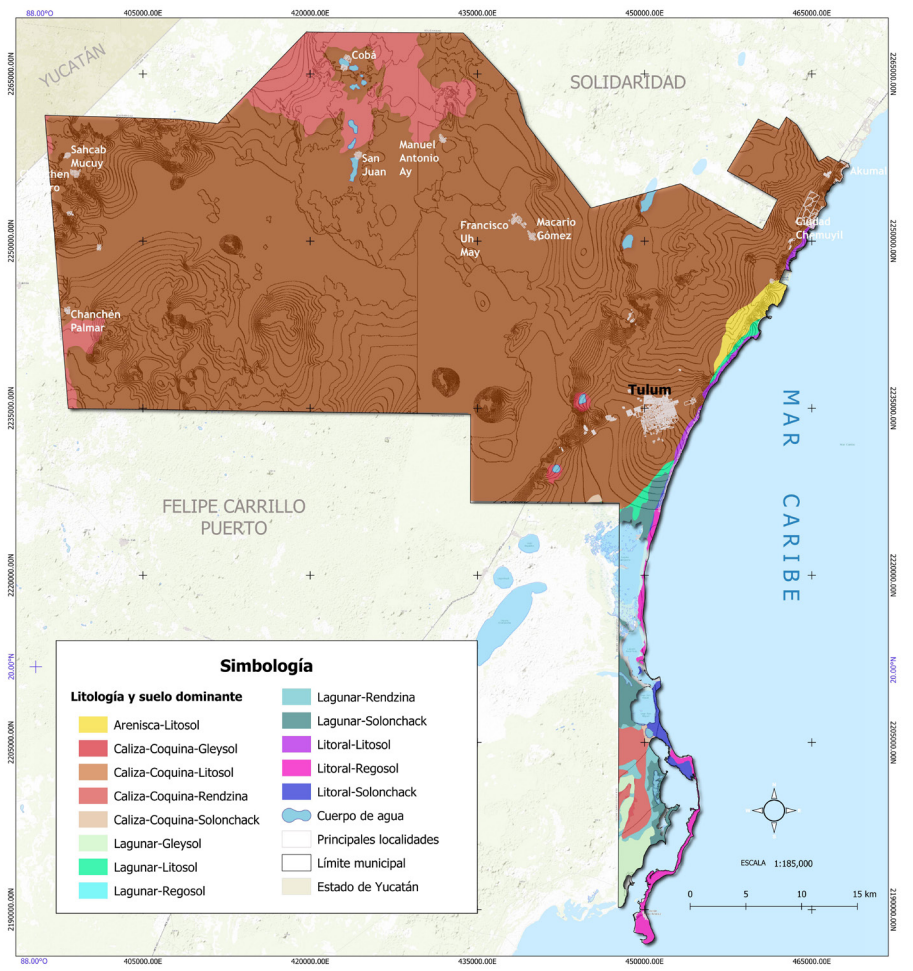


Fuente: Elaboración propia con base en las Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014) y Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx).

A partir de la descomposición de las rocas y cambios bruscos de temperatura y por la acción del agua y el viento, existen una gran variedad de suelos en el municipio de Tulum. Mencionados a detalle en apartados anteriores (Fase 1). Los suelos predominantes en el municipio de Tulum son los Litosoles los cuales son suelos poco desarrollados que presentan contacto lítico a 30 cm o menos de profundidad.

En algunos casos es posible observar un material gravilloso grueso y roca consolidada, producto de la meteorización de esta última. El siguiente tipo de suelo que se localiza de acuerdo con la superficie que ocupa del territorio municipal son las Rendzinas los cuales se desarrollan en entornos ricos en magnesio o calcio, desarrollado en la roca madre calcárea o dolomítica con espesor < 50cm.

Figura 101. Litología y suelos dominantes del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia con base en el conjunto de datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano, SGM (2020). Capa Geológica a nivel República a 1:250 000. Códigos litológicos. Servicio Geológico Mexicano. Recuperada de: https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#; INEGI (2019). Cartas Geológicas 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México; INEGI (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.

También se localizan Gleysoles, Solonchaks y Regasoles, los primero son suelos influenciados por el agua, suelos fangosos con exceso de humedad, localizados en zonas bajas y de poca profundidad (<40cm), los segundos también se encuentran influenciados por agua, pero en zonas salinas, con material no consolidado y en lugares estacionalmente inundados, y los últimos desarrollados sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina, suelos más profundos entre 25 a 100 cm (ver mapa Edafología, figura 9, pag. 10). En la figura 101 se muestra la combinación de rocas y suelos dominantes para el municipio de Tulum como uno de los factores que intervienen en el cálculo de la susceptibilidad de laderas.

A partir de lo anterior, se precisa que el espesor del suelo es muy pequeño y homogéneo en toda la zona de estudio, ya que la mayor parte del territorio está cubierta por unidades de Litosoles, son un tipo de suelo con un espesor menor a 10 cm y un volumen total de menos del 20 % de tierra fina sobre afloramientos rocosos International (Union of Soil Sciences, 2008), por tanto, el peso que aporta este factor es el mínimo y es el mismo para todo el municipio.

FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES

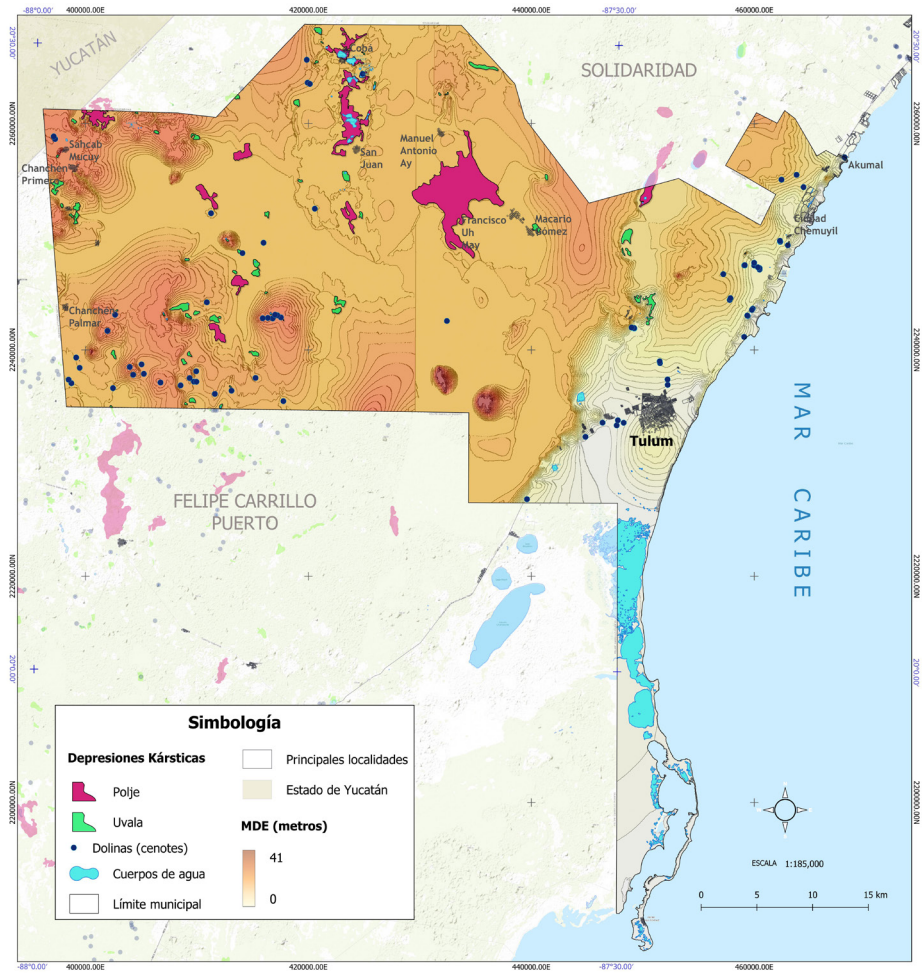
Evidencias geomorfológicas de “huecos” en laderas contiguas

Quintana Roo se caracteriza por ser una planicie con piso rocoso (caliza) con una altitud media de 50 m s. n. m. El municipio de Tulum, por su parte, cuenta con una altitud media de 18 m s.n. m., donde predominan planicies y mesetas kársticas. No obstante, ya que la roca predominante es caliza, debemos tener en cuenta que existen procesos de disolución a largo plazo por la filtración del agua, razón para no construir en este tipo de suelos por su vulnerabilidad. A esto se le conoce como proceso de karstificación, más propenso en rocas carbonatadas como la piedra caliza, la dolomita y otras rocas solubles. Al ser un proceso continuo y en evolución, la disolución modifica la superficie y el subsuelo, mostrando así depresiones geológicas características del karst: dolinas, cuevas y redes de conductos localizadas a través de aperturas subsuperficiales (Hernández, 2019).

La topografía del karst se desarrolla por etapas, la combinación de los procesos de disolución da origen a las dolinas, que pueden presentarse de manera aislada o agrupada; estos procesos igualmente pueden ocasionar depresiones mayores con áreas progresivamente más grandes, originando uvalas y poljes (Fragoso-Servón et al., 2014). Se localizan tan-

to en la superficie como en el subsuelo, por ello el relieve kárstico en Quintana Roo se ha tenido que dividir en dos zonas, el endokarst (en el subsuelo) y el exokarst (en la superficie).

Figura 102. Mapa de dolinas, uvalas y poljes del municipio de Tulum.



Fuente: Elaboración propia con base en las Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014) y Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx) y el conjunto de datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano, SGM (2020).

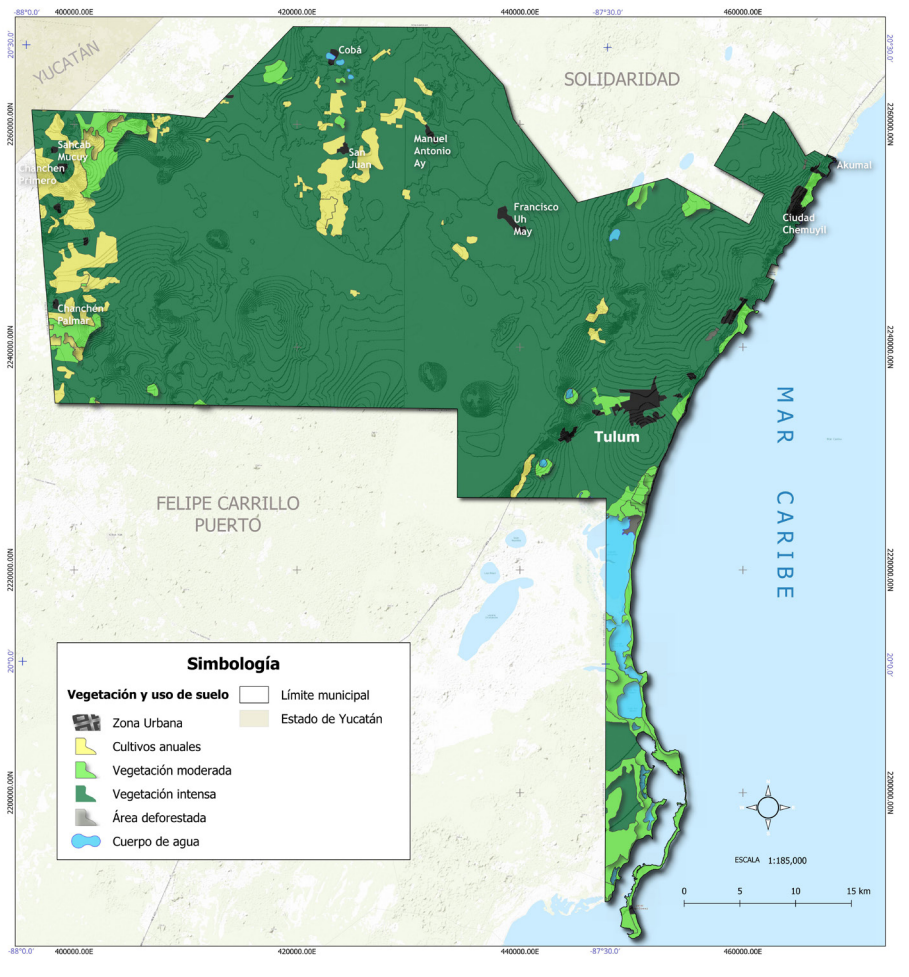
Por otra parte, la filtración y concentración del agua en suelos de roca caliza, principalmente en el subsuelo, puede dar origen al colapso de una dolina, esto puede exponer la entrada a un sistema subterráneo de cuevas, formándose huecos en el terreno o también por el agua que ha disuelto por completo la roca que subyacente convirtiéndola casi en una gran caverna (figura 102). Las dolinas (cenotes en la Península de Yucatán) son galerías en sistemas de cuevas subterráneas y conforme a la caída de agua de lluvia que contiene dióxido de carbono se van disolviendo y ensanchando, posteriormente el material de los techos cae por gravedad y se forma la depresión convirtiéndose en cenotes la mayoría de las veces (Hernández, 2019).

Vegetación y uso de tierra

Se realizó una reclasificación a partir de las capas vectoriales de la serie VII de Vegetación y Usos de suelo del INEGI (2018) hasta agruparla en cinco categorías: 1) Zona urbana, 2) Cultivos anuales, 3) Vegetación intensa, 4) Vegetación moderada y 5) Área deforestada, de acuerdo con la metodología de Moral (2014), clases que intervienen en el proceso seleccionado (figura 103).

La mayor parte del territorio del municipio de Tulum tiene vegetación intensa, principalmente ocupada por selva. Le sigue la vegetación moderada y los cultivos anuales, con mínimas áreas deforestadas. Las áreas cultivadas se localizan cercanas a localidades de Cobá y San Juan al norte del municipio y de Sahcab Mucuy, Chanchen Primero y Chanchen Palmar al Oeste. En las hondonadas, se encuentran suelos más impermeables, como los Gleysoles y Solonchak. Estos suelos se encuentran asociados a sistemas o unidades litológicas que quedan sumergidas al menos por una parte del año, es decir, son sitios naturalmente inundables por la impermeabilidad del suelo. Asimismo, existe suelos delgados como son los Litosoles. La mayor parte del territorio se encuentra cubierta por selva y vegetación secundaria, con un mínimo porcentaje ocupado por asentamientos humanos y áreas de cultivo, así como pocos cuerpos de agua superficiales, en su mayoría son aguas subterráneas.

Figura 103. Mapa de vegetación y uso de suelo municipio de Tulum



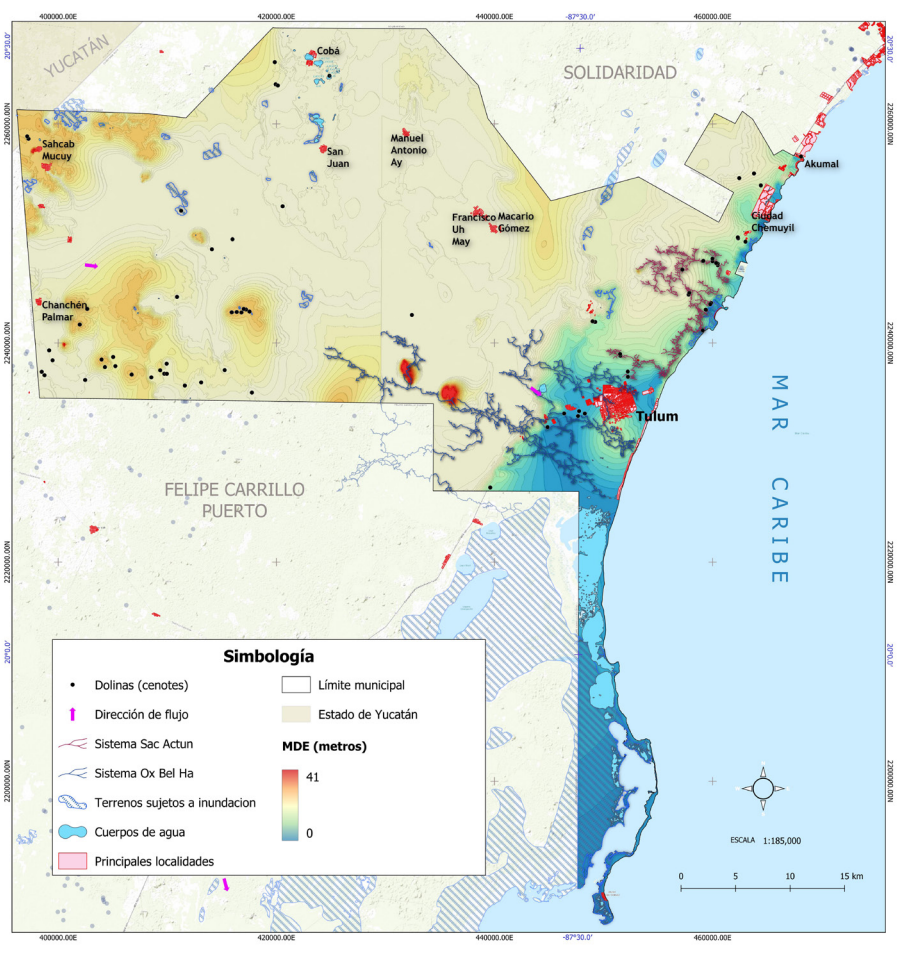
Fuente: Elaboración propia con base en la capa vectorial de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Régimen del agua en la ladera

En cuanto al factor geomorfológico y ambiental, llamado régimen de agua en la ladera, si bien no existen laderas importantes, existe presencia de depositos de agua, principalmente subterráneos o en su parte baja, al Sureste, cerca a la costa y en su parte Este donde se identifican dos sistemas de aguas subterráneas (figura 104): sistemas de cuevas subacuáticas Sac Aktun y Ox Bel Ha (QRSS, 2018; Kambesis & Coke, 2016). Asimismo existe terrenos sujetos a inundación cercanos al Área Natural Protegida de la Biósfera de Sian Ka'an.

Como se ha mencionado, el municipio se encuentra sobre planicies kársticas por donde existen corrientes subterráneas las cuales se señalan en flechas rosas (figura 103). Asimismo, se numeran las depresiones kársticas, dolinas, uvalas y poljes, obtenidas del estudio de Fragoso, et al. (2014) y del INEGI (2018). Las inundaciones extraordinarias son menos frecuentes fuera del área urbana, sin embargo se pueden encontrar inundaciones permanentes cerca de dolinas (o cenotes) y uvalas, y temporal en los poljes.

Figura 104. Mapa de régimen del agua municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia con base en las Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014); SIATL-INEGI (2018); MDE del CEM 3.0, INEGI) y Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx).

5.1.4.3. Resultado análisis

Los valores propuestos para calificar los diversos atributos de una ladera en el municipio de Tulum deben considerarse sólo indicativos y deberán revisarse periodicamente para irse actualizando atendiendo a las experiencias de deslizamientos pasadas y los que ocurran en el futuro.

Se realizaron modificaciones a los mapas originales que marcaban las metodologías de Suárez (1998) y Moral (2014), al factor altura se considero como el desnivel entre la máxima altura y la minima por zona, antecedentes de deslizamiento no han existido por la topografía del terreno, los aspectos estructurales en formaciones rocosas con pendientes pronunciadas no se han tenido en cuenta por la caracteristicas de la zona de estudio y los pesos para nivel freático no se evaluaron debido a la falta de información, ya que la extensión geográfica de las regiones hidrológicas del país no es coincidente con los límites territoriales de los municipios (DOF, 2023).

Se procedió a la integración de la información recopilada en un a través de un Sistema de Información Geografica, llevando a cabo geoprocesamientos para la homogenización y tratamiento de los datos, desde el cual se integró factores topográficos e históricos, geológicos y geotécnicos así como geomorfologicos y ambientales. El resultado de esta sobreposción de información se muestra en el mapa 30 donde se identifican 4 zonas (Z1 a Z4).

En la tabla 90 se expone el resultado obtenido a partir de las de la metodologías mencionadas y aplicadas al territorio municipal de Tulum (tablas 85, 86 y 87). En ésta, se eliminaron factores que no se manejaron para el cálculo. Los pesos originales han sido multiplicados por 10 para introducirse como número enteros.

1. *FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS:* El factor pendiente obtenido fue de 0.5 al tener pendientes menores a 15°, que al multiplicarlo por 10 da un valor de 5. El valor para el factor MDT o MDE fue para las cuatro zonas fue de 0.6 por tener una altitud menor a 50 metros, siendo 6 el valor para cada una. En cuestión de antecedentes de la amenaza no se conoce algún acontecimiento para este fenómeno por lo que el valor es 0.3 que multiplicado por 10 es 3.

2. *FACTORES GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS:* En cuanto al factor edafología y litología la Z1 en su mayoría son litosoles y calizas por lo que se le otorgó un valor de 0.5 que equivale a rocas sedimentarias (calizas, areniscas) y el valor alcanzado fue 50. Para la Z2, con roca calizas-coquinas y la identificación de diversas dolinas su valor fue de 0.3 (30). Para la Z3 donde se localizan rocas calizas-coquinas, litorales y lagunares se les dio el valor 1.5 (15). Finalmente, para la Z4 también cuenta con suelo litosoles y redzinas, sin embargo, es un área de menor superficie por lo que su valor alcanzado fue 30. Para el espesor de la capa del suelo todas las zonas identificadas son menores de 5 m (0.5), por lo que su valor es de 5.

3. *FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES:* Para estos factores como evidencias geomorfológicas se tomaron en cuenta, las dolinas, uvalas y poljes por zona, para lo cual la Z1 contiene una depresión considerable por lo que se le dio el valor de 10 (1.0), la Z2 por su parte, contiene dolinas, uvalas y poljes, pero de menor superficie, se le dio el valor de 5 (0.5), para la Z3 no contiene evidencias por lo que su valor fue de 0 y la Z4 contiene uvalas y cenotes en menor medida se le dio el valor de 5. En cuanto al factor de Vegetación y Uso del Suelo estos tiene distintos valores relativos los cuales se debieron sumar por polígono, zonas urbanas (2.0), cultivos anuales (1.5), vegetación intensa, este factor tiene presencia en todo el territorio ya que la mayor vegetación corresponde a selva (0.0), sin embargo, este tipo de vegetación es protección natural por eso el valor de cero, el siguiente es la vegetación moderada (0.8) identificada con mayor presencia en las zonas 2 y 4. En cuanto a áreas deforestadas (2.0) ninguna cumple este criterio.

4. *RÉGIMEN DEL AGUA:* Como ya se mencionó no se tomó en cuenta las variables de nivel freático ya que las regiones hidrológicas del país no son coincidentes con los límites territoriales de los municipios, en cuanto a la última variable depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma se valoraron los cuerpos de agua y los sistemas de aguas subterráneas (1.0).

Tabla 89. Asignación de pesos en cada zona identificada y analizada

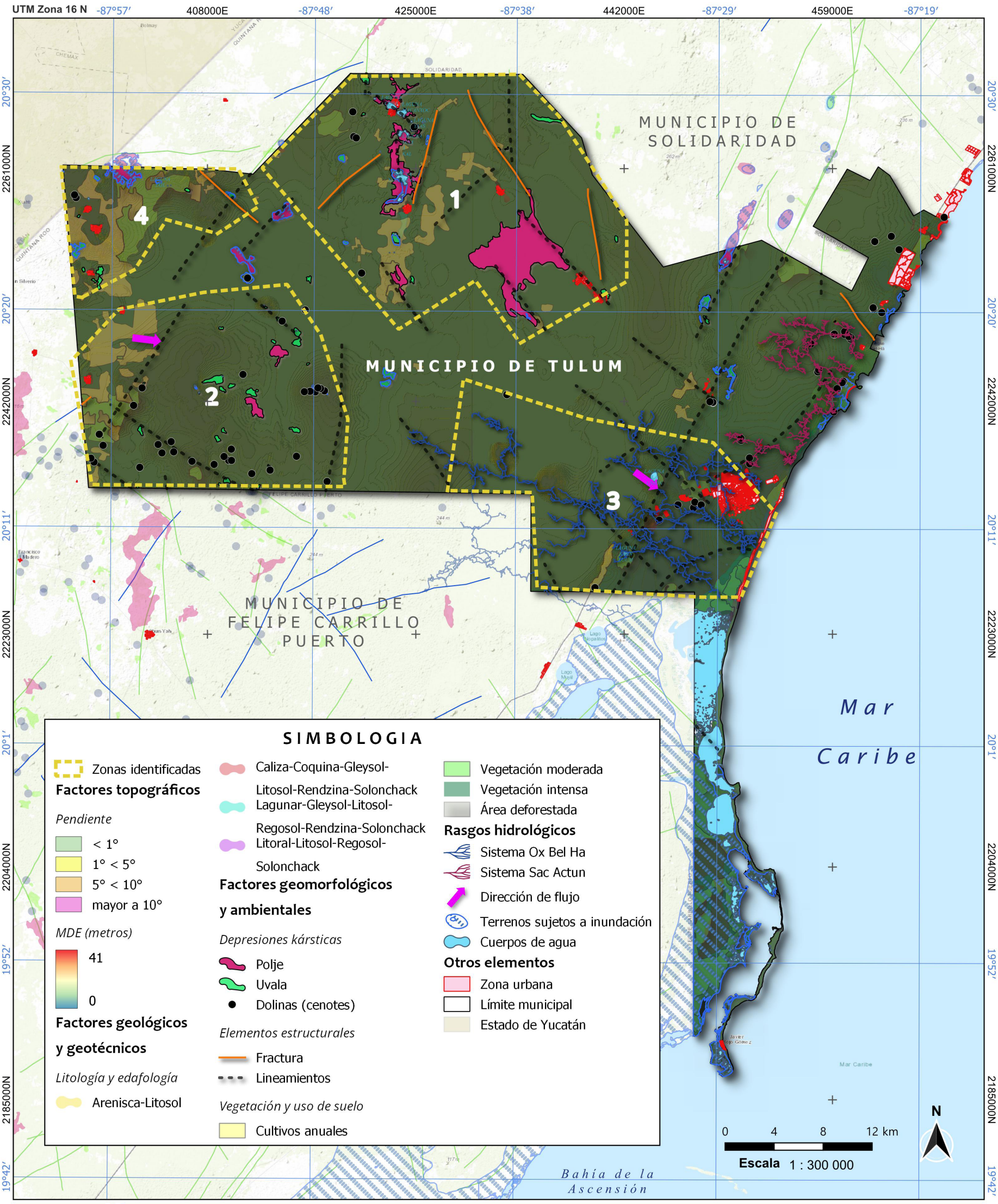
FACTORES DE SUSCEPTIBILIDAD	CAPA DE DATOS	PESO O ATRIBUTO RELATIVO			
		Z1	Z2	Z3	Z4
Inclinación de los taludes (pendiente)	Pendientes	5	5	5	5
Altura	MDT	6	6	6	6
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	Protección Civil	3	3	3	3
Tipo de suelos o rocas	Edafología y litología	50	30	15	30
Espesor de la capa de suelo	Edafología	5	5	5	5
Evidencias geomorfológicas de “huecos” en laderas contiguas	Dolinas, uvalas y poljes	10	5	0	5
Vegetación y uso de suelo	Vegetación y usos suelo	35	23	35	43
Régimen del agua en la ladera	Terrenos sujetos a inundación, cuerpos de agua, corrientes superficiales y subterráneas	0	10	10	0
	SUMATORIA	114	87	79	97

5.1.4.4. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados

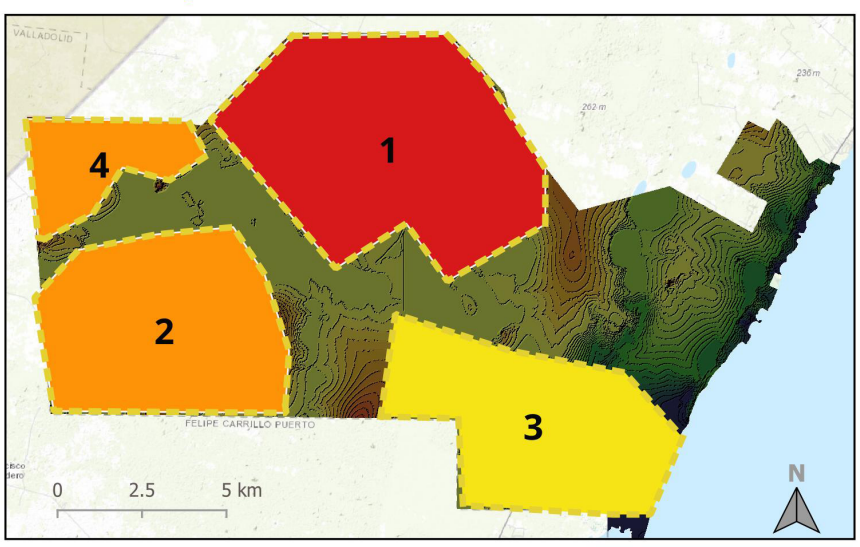
A partir de la tabla 90 y la integración de información recopilada en bases geoespaciales se obtuvo el mapa de susceptibilidad a deslizamiento de laderas (figura 105) tomando en cuenta la calificación de los factores físicos geográficos que se incluyeron.

Como se puede advertir con claridad las diferentes zonas obtuvieron valores con distinta susceptibilidad. Si bien, no existen laderas con altitudes considerables, el factor más importante en las zonas fue el tipo de suelo y rocas. Las zonas de estudio van de valores de susceptibilidad de muy alta a media a sufrir deslizamientos de ladera. Sin embargo, no tan significativos ya que la mayor altitud del municipio es de 41 metros localizada principalmente en la zona tres, asimismo se observa el desarrollo de asentamientos humanos cercanos a depresiones kársticas.

Figura 105. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de laderas municipio Tulum



5.1.4. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos de laderas



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología
Zonas identificadas

Grados de susceptibilidad
Muy alta
Alta
Media
Baja
Muy baja

Fuente:
Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014); SIATL-INEGI (2018); Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). .Capa vectorial de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional (INEGI, 2018). Datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano, SGM (2020). Capa Geológica a nivel República a 1:250 000. Códigos litológicos. Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx)

Información técnica:
Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

5.1.5. Hundimientos

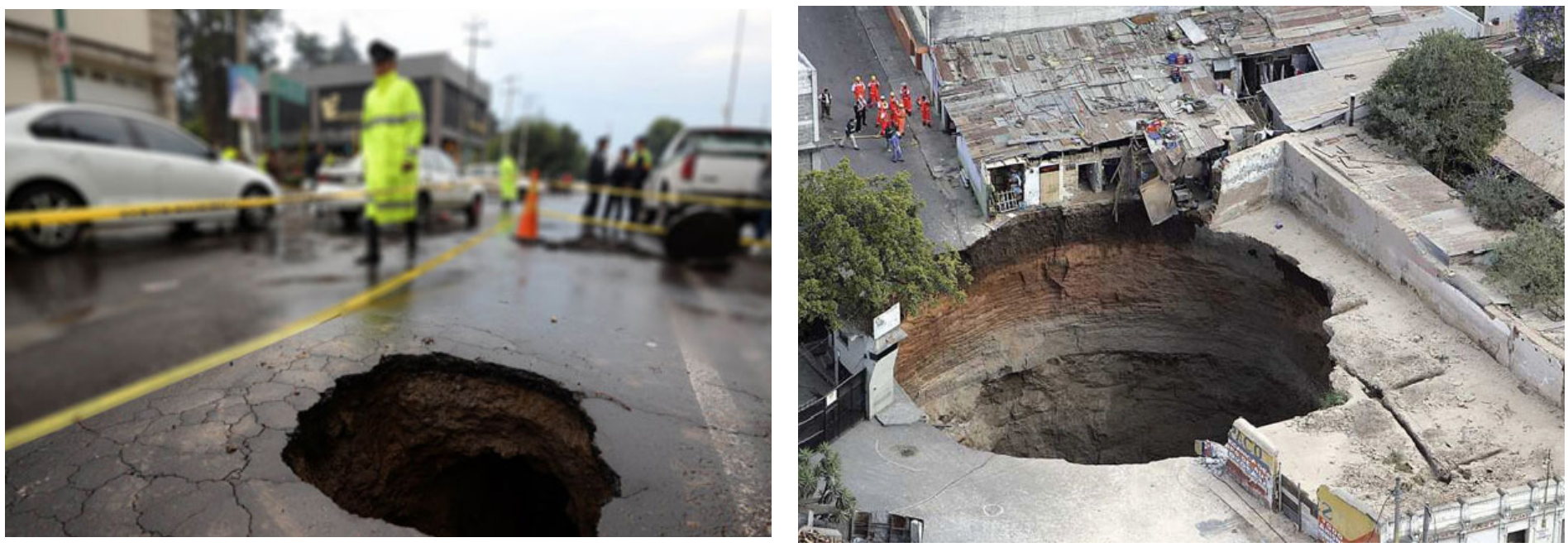
La estimación del riesgo implica conocer las posibles consecuencias del fenómeno natural sobre el territorio, las cuales dependen de las características físicas del entorno, los asentamientos humanos y de la infraestructura existente (Hernández, 2019). Sin embargo, debemos tener en cuenta que los análisis de peligro o amenaza son más objetivos, ya que se basan en la descripción e información física del territorio poco cambiante con el tiempo, en contraste, los análisis de riesgo son muchos más complejos, porque reflejan la interacción entre los ecosistemas y el entorno, y la de estos con las actividades humanas.

Los fenómenos de hundimientos y subsidencia del subsuelo son cada vez más comunes en varias zonas del mundo, especialmente en las grandes urbes, como en la Ciudad de México. Estos fenómenos ya han sido reconocidos en el catálogo de la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) como un peligro geológico. En México, el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) ha adoptado la clasificación basada en el tipo de agente perturbador que los produce, al igual que CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). Donde se distingue a los hundimientos y subsidencias como agentes perturbadores de riesgos de origen geológico (Hernández, 2019).

La presencia de hundimientos en los territorios es algo que se ha producido durante décadas, sin embargo, debido a la extracción excesiva de agua subterránea durante las épocas de sequía en algunos lugares, los hundimientos se producen más deprisa, poniendo a las infraestructuras de la superficie en un riesgo creciente de sufrir daños.

En el sureste mexicano, específicamente la Península de Yucatán, es caracterizada como zona kárstica, compuesta de roca caliza y una gran presencia de fracturas y fallas geológicas. Por lo que esta amenaza es de gran importancia en la región. Los hundimientos son comunes en donde la roca que existe debajo de la superficie es piedra caliza, roca de carbonato, tiene capas de sal o son rocas que pueden ser disueltas naturalmente por la misma circulación del agua subterránea. Al disolverse la roca, se forman espacios y cavernas subterráneas. La apariencia de los hundimientos es impresionante porque el suelo se mantiene usualmente intacto, por cierto, tiempo, hasta que los espacios adentro de la tierra subterránea se hacen demasiado grandes para seguir dando suficiente apoyo a la tierra de la superficie. Si no se cuenta con suficiente apoyo para la tierra que se encuentra sobre los espacios y cavernas subterráneas, entonces puede ocurrir un colapso súbito en la tierra. Estos colapsos pueden ser pequeños, como se muestra en la siguiente figura, pero también pueden ser grandes y ocurrir en el lugar en donde se encuentra construida una casa o un camino.

Figura 106. Hundimientos y socavones



Fuentes: Foto 1: UNAM (https://dereporteros.com/2018/09/04/hundimientos-suelo-pueden-causar-desastres-los-provocan-los-sismos/). Foto 2: Centro de Investigación y Mitigación de Desastres Naturales CIMDEN (https://www.eird.org/esp/revista/no-14-2007/art16.html).

Se puede definir a los hundimientos como movimientos de la superficie terrestre en los que predomina el sentido vertical descendente y que tiene lugar en áreas de muy baja pendiente. Pueden ser inducidos por distintas causas y se pueden desarrollar con velocidades rápidas o lentas según sea el mecanismo que da lugar a la inestabilidad. La causa de los colapsos implica el fallo de la estructura geológica que sostiene una porción del terreno bajo el cual existe una cavidad, lo que puede venir motivado por la disolución de las rocas hasta el límite de la resistencia de los materiales, el vaciado de los acuíferos o en general por el debilitamiento por meteorización física o química de una estructura que alberga una cavidad.

El aprovechamiento de los recursos naturales (actividad minera, explotación de acuíferos) también puede inducir colapsos. Los procesos fluviales pueden ser significativos en la formación de algunos ragos terrestres superficiales y subterráneas.

En Quintana Roo, los entornos donde se combina la alta presencia de los procesos de disolución y fracturamiento se encuentran en tres áreas diferenciadas de la siguiente manera, de acuerdo con Fragoso-Servón, et al. (2014):

1) Planicies subhorizontales al norte de Quintana Roo, sobre unidades litológicas recientes, con vegetación dominante de selva mediana subperennifolia, en la cual predominan suelos Leptosoles o Litosoles solos o combinados con Geysoles e incluso Vertisoles, en los que se encuentran una gran cantidad de depresiones kársticas;

2) Planicies acolinadas del centro-oeste del estado, con formaciones de la época geológica del Eoceno, donde los suelos dominantes son Phaeozems/Luvisol/Cambisol y Leptosol/Luvisol, que son utilizados para pastizales y cultivos; y, por último

3) Unidades litológicas más antiguas, sobre lomeríos y montañas al suroeste, los suelos dominantes son Leptosoles/Phaeozems/Vertisoles en los que se desarrolla una selva mediana subperennifolia.

El municipio de Tulum se encuentra en la primera clasificación donde los suelos dominantes son los litosoles o leptosoles y la roca es caliza-coquina. Asimismo, se han identificado dos grandes sistemas de cuevas subterráneas: Sac Aktun y Ox Bel Ha que constituyen los dos sistemas de cuevas freáticas más grandes de México y del mundo (también llamadas “ríos subterráneos”). El Sistema Sac Aktun tiene registrados 369.2 km de longitud, mientras que Sistema Ox Bel Ha comprende 319.5 km. Sin embargo, existen muchas otras cuevas subacuáticas y cuevas secas registradas en el Estado de Quintana Roo (Monroy-Ríos, 2022).

Los paisajes kársticos, como los que se pueden observar en el municipio de Tulum, al exponerse a precipitación abundante están sujetos a formar hundimientos. Estas rocas son susceptibles a disolverse al contacto de la lluvia ácida y al agua freática. Las ranuras naturales en este tipo de rocas se hacen más anchas y se expanden con las corrientes de agua. Comúnmente se hacen cuevas de las rocas. Cuando colapsa el techo de una cueva por el sobrepeso de la roca, se forma un hundimiento y cualquier cosa que haya estado localizada sobre el hueco se viene abajo (figura 107).

Figura 107. Colapsos de techos de cuevas subterráneas



Fuente: En Tulum existen alrededor de 2 mil kilómetros de cavernas. Foto: Greenpeace México (https://www.forbes.com.mx/cenotes-y-rios-subterraneos-pueden-colapsar-via-del-tren-maya-alertan/).

Los hundimientos son relativamente raros aún en áreas fundamentadas con rocas a base de calcio. Los hundimientos sólo ocurren cuando el agua ha disuelto por completo la roca subyacente convirtiéndola casi en una gran caverna y es cuando el techo de ésta se vuelve débil y no soporta el material (figura 108).

El relieve kárstico en el municipio de Tulum se puede clasificar de acuerdo con la progresión de la disolución: endokarst (en el subsuelo) y exokarst (en la superficie). En la primera el proceso de disolución de rocas carbonatadas se lleva en el subsuelo: cuevas y espeleotemas (estalactitas, estalagmitas, etc.) que se forman dentro de ellas (figura 108). En la segunda, en la zona superficial, una de las más conocidas son las dolinas o cenotes, así como uvalas y poljes (figura 109).

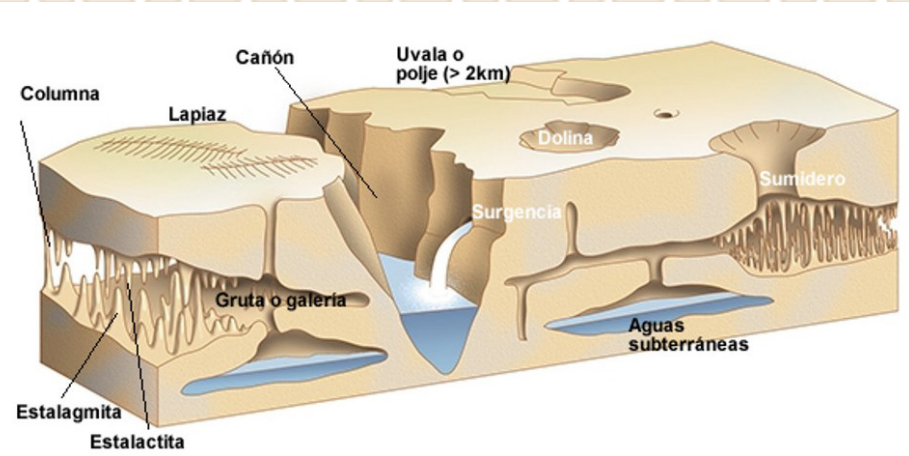
Figura 108. Progresión de la disolución



Fotos: María Luisa Hernández Aguilar (2022).

Particularmente, el nombre de dolina proviene del eslavo doline que significa depresión y su equivalente en maya “dzonot” o cenotes, siempre y cuando contenga agua. Podemos decir que, las dolinas y las uvalas son colapsos y los poljés y las rejolladas son hundimientos. El colapso es vertical, por ejemplo, las rejolladas, depresiones circulares son resultado de hundimientos de la bóveda de un cenote milenios atrás, son colapsos verticales (hundimientos) en cuyo subsuelo permanece el agua de manera subterránea (figuras 108 y 109).

Figura 109. El modelado kárstico.



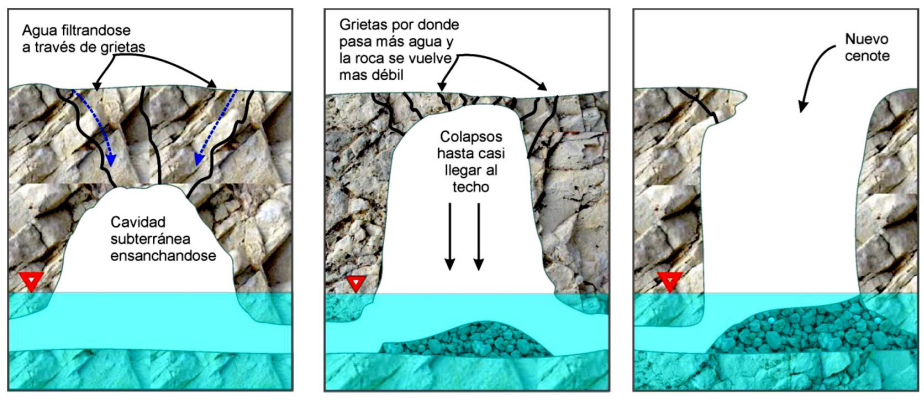
Fuente: http://www.apic.es

Las dolinas se pueden definir como depresiones cerradas, las cuales pueden medir desde metros hasta un kilómetro de diámetro. Se forman en las intersecciones de varias fracturas, y muchas veces están cubiertas de suelo que impiden identificarlas, a menos que haya cortes en el terreno, como en las carreteras. No obstante, su formación es variada iniciando con la disolución de las rocas, la cantidad de agua que pase por ella y sus conexiones con alguna cavidad que reciba los elementos disueltos.

Los sistemas kársticos son un tipo de paisaje donde la disolución del lecho rocoso ha creado sumideros, arroyos subterráneos, uvalas, poljes, dolinas, cuevas, manantiales y otros rasgos característicos (figura 109). Entre los que se localizan en el municipio de Tulum encontramos: dolinas o cenotes, uvalas y poljes identificados a partir de la investigación de Fragoso-Servón, et al. (2014).

Si el colapso de una dolina permite la entrada a un sistema subterráneo de cuevas, entonces lleva el nombre de “ventana kárstica”. La mayoría de las dolinas o “cenotes” de la Península de Yucatán son dolinas de colapso. En el inicio, estos cenotes fueron galerías en sistemas de cuevas subterráneas, y conforme a la caída de agua de lluvia que contiene dióxido de carbono se fueron disolviendo y ensanchando, posteriormente el material de los techos cayó por gravedad y se formó el hueco (figura 3). Al mismo tiempo, los techos de las dolinas quedaron muy delgados y también colapsaron convirtiéndose en cenotes (figura 110).

Figura 110. Colapso de dolinas



Fuente: Tomado de Velázquez (2016). De izquierda a derecha se ve cómo el agua va ensanchando cada vez más la cueva por efecto de disolución. Después el material empezó a caer por gravedad e irse por un conducto. Finalmente, cuando los techos de las dolinas son muy delgados, colapsan y dejan un hermoso cenote; claro que el agua que se infiltra por el techo también lo vuelve más frágil. El triángulo significa nivel freático.

Los cenotes siempre contienen agua, esto se debe a que el nivel freático está muy cerca de la superficie topográfica (figura 111). Las rocas carbonatadas son muy solubles, por lo que el agua de lluvia se infiltra completamente al subsuelo hasta encontrar una barrera que ya no la deje pasar, y se acumula desde ahí; el nivel freático es el límite superior de esta acumulación de agua y su símbolo es un triángulo invertido (figura 110 y 111). La palabra cenote se usa hoy en día en forma extendida para referirnos a dolinas con agua, ya que, no todas las dolinas son cenotes, pero todos los cenotes son dolinas.

Figura 111. Formación de dolinas



Fuente: Tomado de Velázquez (2016). Se aprecia el agua dulce sobre el agua salada, se marca el nivel freático. Se puede observar también una dolina que no ha colapsado y otra ya abierta.

Las uvalas por su parte, son la fusión de dos o más dolinas (figura 111). Depresiones cerradas el lecho de roca o material superficial está compuesto de minerales de carbonato que son propensos a disolverse en agua, se distinguen de las dolinas en cuanto a escala, morfometría y su interrelación. Morfométricamente, las uvalas suelen tener pendientes más suaves que las dolinas y tienen formas más complejas. Los diámetros de las uvalas en el karst de piedra caliza son típicamente 1000–5000 m (Watson et al., 2019).

Por otro lado, los poljes son depresiones extensas con suelo plano y paredes empinadas, pero sin un flujo superficial de salida y localizados principalmente en regiones con topografía kárstica (figura 111). A veces pueden contener un pantano o un pequeño lago en su interior, y se podrían clasificar en función de su tamaño.

5.1.5.1. Metodología

La identificación del peligro por amenaza de hundimientos implicó la determinación de escenarios desfavorables que pudieran ocurrir, su vulnerabilidad asociada y el cálculo del riesgo sobre el territorio analizado, estos dos últimos se presentan en fases posteriores.

Para el municipio de Tulum la fuente principal de la identificación de formaciones geomorfológicas como las dolinas, uvalas y poljes se tomaron de los resultados de la investigación de Fragoso-Servón, et al. (2014), de las cartas topográficas del INEGI, así como del trabajo de campo desarrollado durante la elaboración del Atlas Municipal de Riesgos de Tulum (2023).

Las zonas propensas a la amenaza de hundimientos se determinaron a partir de la sobreposición geoespacial de capas vectoriales correspondientes a las variables del entorno físico antes mencionadas dando como resultado principal el mapa de susceptibilidad a hundimientos. Lo que permitió observar cuantas áreas son propensas a hundimientos en el territorio municipal, para que posteriormente se calcule la vulnerabilidad y riesgos a su interior sumando las variables de localidades, número de personas, así como infraestructura y vías de comunicación.

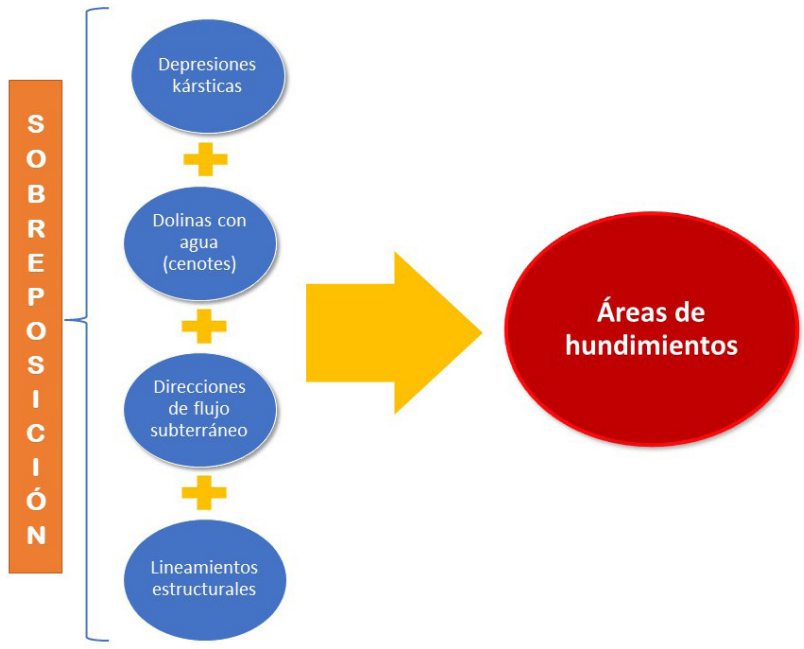
La metodología general de trabajo siguió la técnica de sobreposición y análisis espacial a través de geoprocesos utilizando software especializado, de acuerdo con la metodología propuesta por Hernández (2019) y Hernández & López (2021), la cual se muestra esquemáticamente en la figura 112.

Para obtener las áreas susceptibles al peligro de hundimientos, se sobrepusieron las capas vectoriales:

- Depresiones kársticas con base en Fragoso-Servón, et al. (2014).
- Dolinas con agua (cenotes), también con base en Fragoso-Servón, et al., (2014) y cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019a).
- Direcciones de flujo de aguas subterráneas (INEGI, 2019b),
- Lineamientos estructurales de la corteza terrestre (fallas y fracturas) obtenidas del Servicio Geológico Mexicano.

Posteriormente, se calculó la densidad de dolinas, partiendo de una malla con celdas regulares de 500 metros por lado (25 hectáreas aproximadamente). Con esa misma malla se calcularon las densidades de los lineamientos estructurales (fallas y fracturas). El procesamiento de datos se realizó a través de la herramienta de análisis espacial "Densidad Kernel"; la cual supone una magnitud por unidad de área a partir de entidades de punto o línea. El resultado expone las áreas con mayores concentraciones de dolinas kársticas y fracturas geológicas. Sabemos que algunas dolinas se forman por el colapso del techo de una cueva subterránea, por lo que son áreas de mayor susceptibilidad al peligro de hundimientos (Hernández, 2019).

Figura 112. Esquema metodológico para la identificación de zonas de hundimientos.



Fuente: Adaptado de Hernández (2019).

5.1.5.2. Memoria de cálculo

La técnica emplea la sobreposición de capas de información temática corroborada o de fuentes oficiales, a través de un Sistema de Información Geográfica desarrollado con software especializado. Los trabajos base para este estudio fueron el de Fragoso-Servón, et al. (2014); Hernández (2019); Hernández & López (2021) y la metodología empleada en los Atlas de Riesgo para los municipios de Benito Juárez y Felipe Carrillo Puerto en Quintana Roo, ambos realizados en 2018 por el Centro de Información Geográfica de la Universidad de Quintana Roo (UQROO-CIG, 2018, 2018a).

Siguiendo la metodología descrita se identificaron en primer lugar las depresiones kársticas, posteriormente las dolinas con agua (cenotes), las direcciones de flujos subterráneos y por ultimo los lineamientos estructurales para el municipio de Tulum. Esta identificación se realizó a través de la sobreposición de capas vectoriales usando software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como marco para recopilar, gestionar y analizar datos.

- **Primer paso** se identificó (figura 113):

1. Depresiones kársticas

   n). Uvalas

   o). Poljes

2. Dolinas

   p). Cenotes con agua

3. Dirección de flujo subterráneo

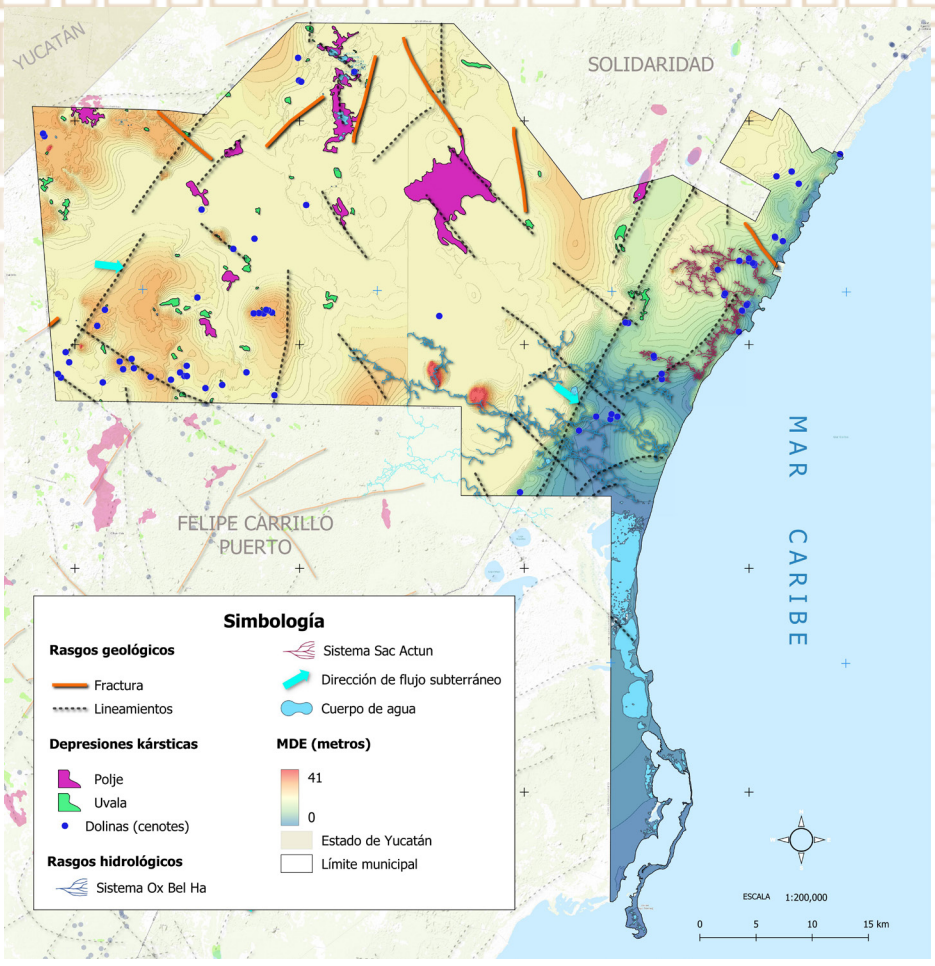
   q). Sistemas de flujos subterráneos

4. Lineamientos estructurales

   r). Fracturas

   s). Rasgos físicos del terreno

Figura 113. Rasgos topográficos y geomorfológicos, Tulum.

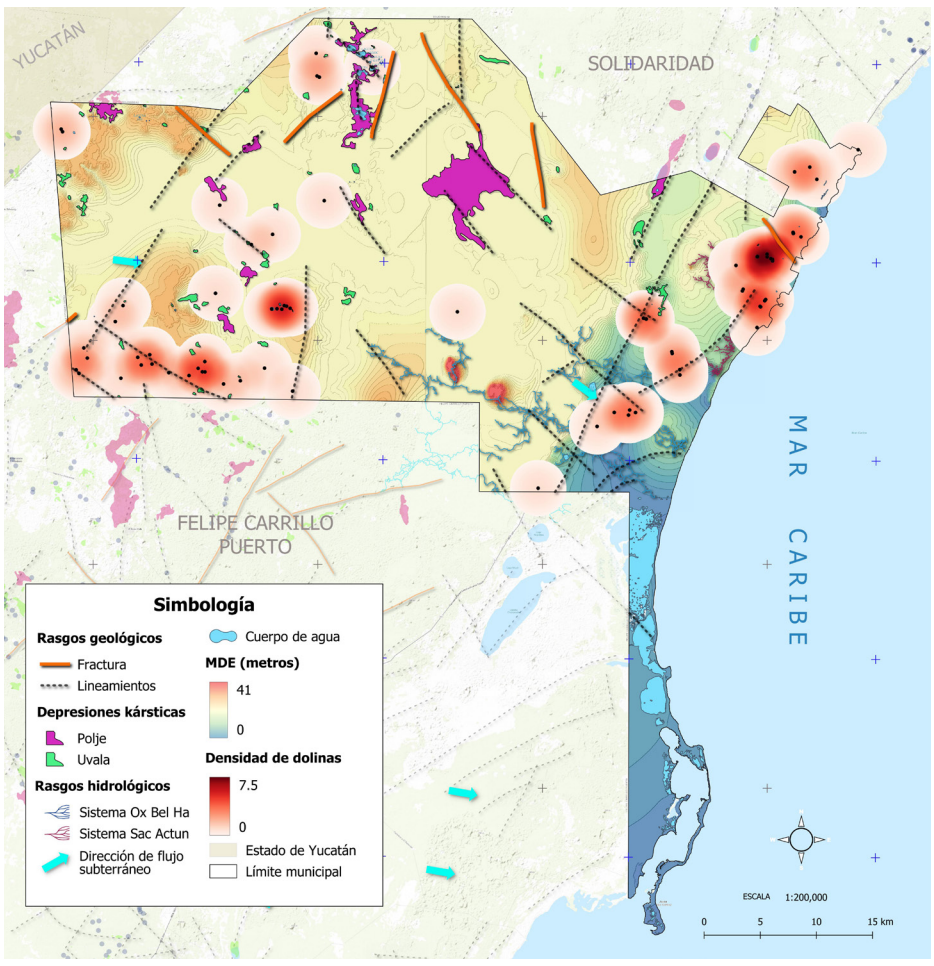


Fuente: Elaboración propia con base en Fragoso-Servón, et al. (2014); Cartas topográficas INEGI, (2019a, 2019b) SGM (2020).

- **Segundo paso** se calculó la densidad de dolinas (figura 114):

Partiendo de una malla con celdas regulares de 15 metros por lado (225 m²) y una distancia de 2,500 metros el procesamiento de datos se realizó a través de la herramienta de análisis espacial "Densidad Kernel" la cual supone una magnitud por unidad de área a partir de entidades de punto o línea.

Figura 114. Concentración de depresiones kársticas, Tulum.

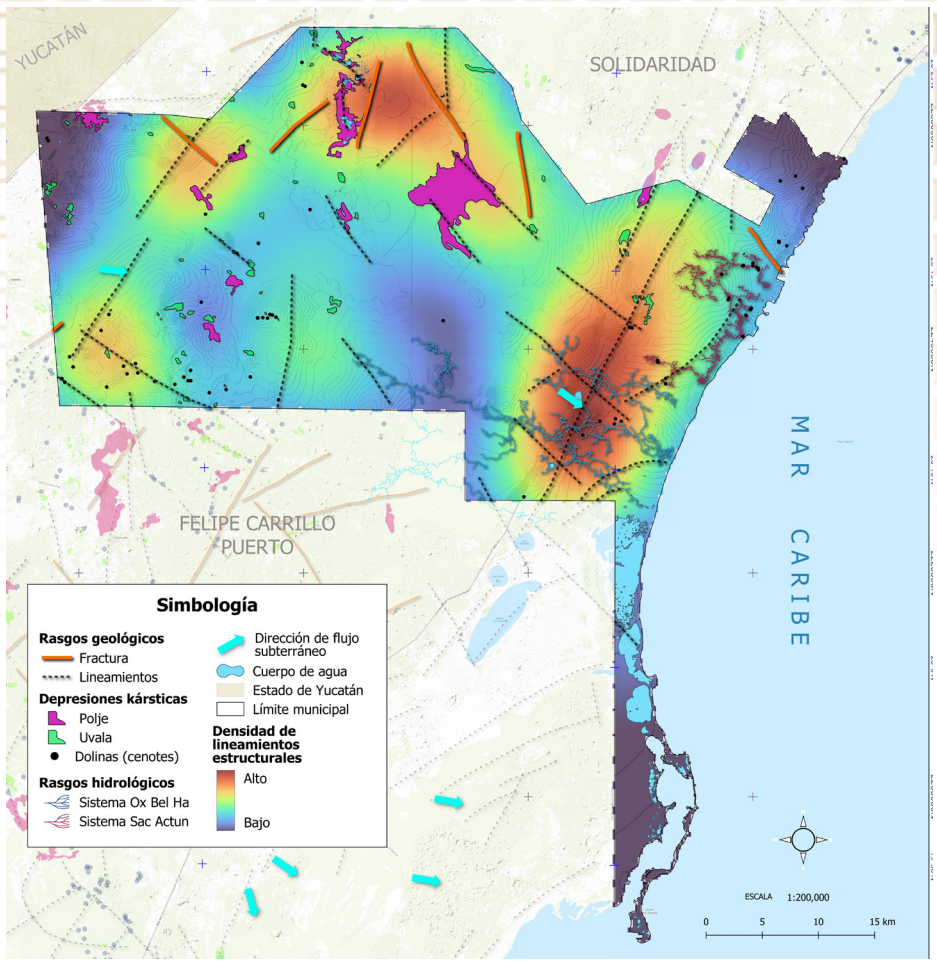


Fuente: Elaboración propia.

- **Tercer paso** se calculó la densidad de lineamientos estructurales (figura 115):

Partiendo de una malla con celdas regulares de 225 m² se realizó el análisis geoespacial de la densidad de fracturas y lineamientos geológicos a través de la herramienta de análisis espacial "Densidad Kernel", la cual supone una magnitud por unidad de área a partir de entidades línea. Con la finalidad de para conocer la actual situación morfológica y geológico-estructural (lineamientos morfoestructurales) identificando su concentración, así como definir probables riesgos existentes en el terreno o medio físico.

Figura 115. Concentración de lineamientos estructurales, Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.5.3. Resultado análisis

Para identificar las zonas propensas a los hundimientos, se tomo en cuenta a las dolinas con inundación permanente conocidas como cenotes que están en contacto con el manto freático y el adelgazamiento del suelo. También la densidad de lineamientos geológicos (figuras 114 y 115). En la figura 116 se observan estas zonas identificadas con número del 1 al 4. Donde las zonas 1 y 3 son las de más susceptibilidad a hundimientos (grado alto). La primera se localiza al Sureste del municipio, incluye la zona urbana de Tulum y el Sistema Ox Bel Ha, la segunda, se localiza en Noreste, ambas cercanas al litoral. En la primera se expone una densidad de lineamientos geológicos considerables, en la segunda la densidad se centra en las dolinas localizadas a su interior.

Le sigue en orden de importancia la zona 2, con una susceptibilidad Media, al Norte del municipio, limitando con el municipio de Solidaridad. En esta se muestra una densidad de fracturas considerable, dolinas, la mayor área de depresión kárstica (poljé).

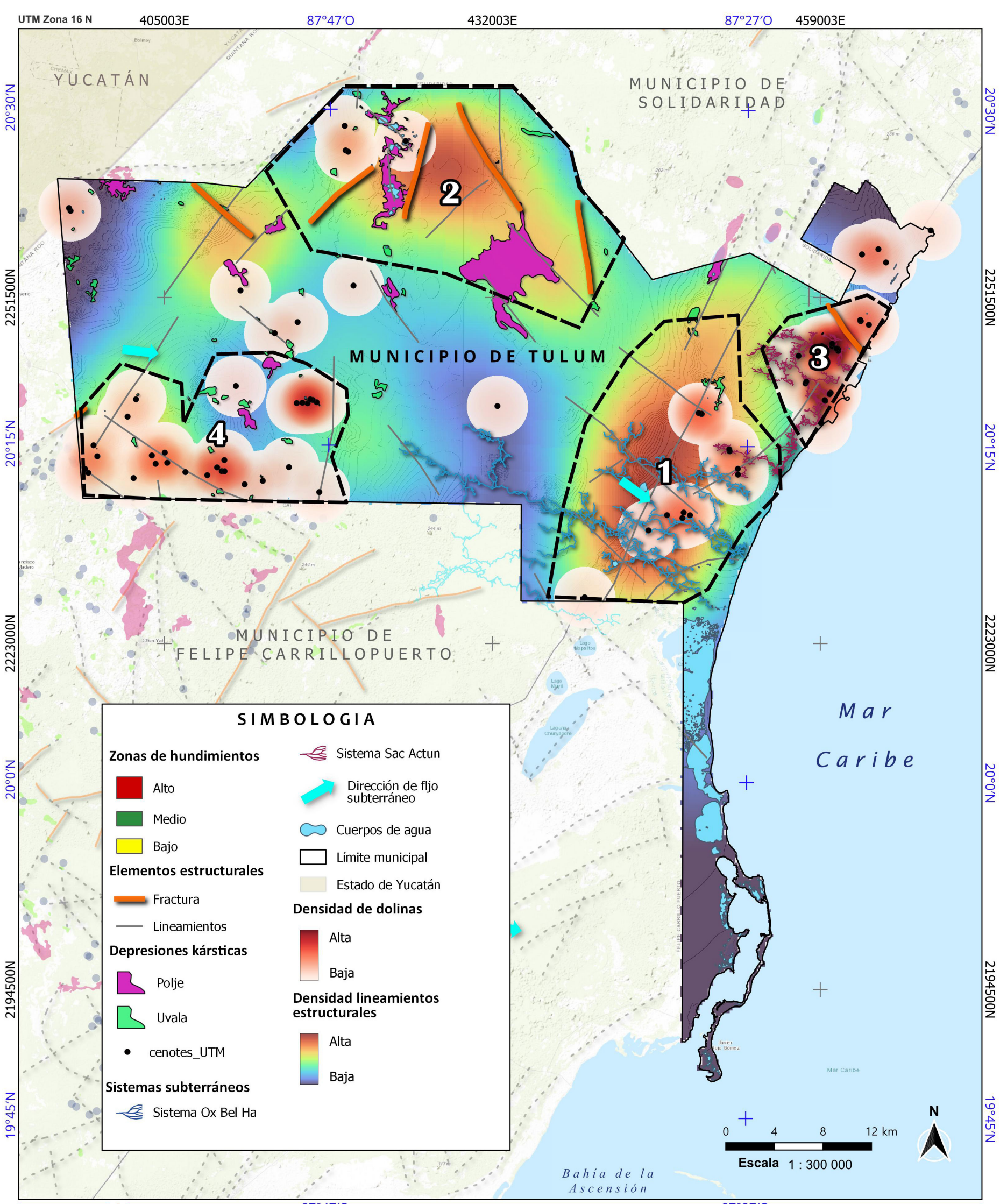
Y por último la zona 4 se encuentra al Suroeste del municipio, la de menor grado, sin embargo, si bien la densidad de lineamientos geológico resulto baja si existe una gran cantidad de dolinas dentro de ella, por lo que, si se una alta concentración. Sabemos que algunas dolinas se forman por el colapso del techo de una cueva subterránea, por lo que son áreas de mayor susceptibilidad al peligro de hundimientos (Hernández, 2019). White (1988) indica que, conocer las formas presentes de las depresiones kársticas como su tamaño y densidad, permite identificar las superficies territoriales con mayor disolución de la roca y por lo tanto el grado de desarrollo del karst.

También se debe tener en cuenta la altitud del terreno, como nos señala Fragoso-Servón, et al., (2014), "en Quintana Roo hay una relación entre la forma de las depresiones kársticas y la altitud: a medida que aumenta la altitud, disminuye la cantidad y el área ocupada por las depresiones kársticas. Las uvalas son las depresiones kársticas presentes en mayor número, seguida por las dolinas y los poljes. Los poljes a pesar de encontrarse en menor número son los que ocupan mayor superficie". El municipio de Tulum tiene una altitud máxima de 41 metros por lo que se debe tener en cuenta esta afirmación.

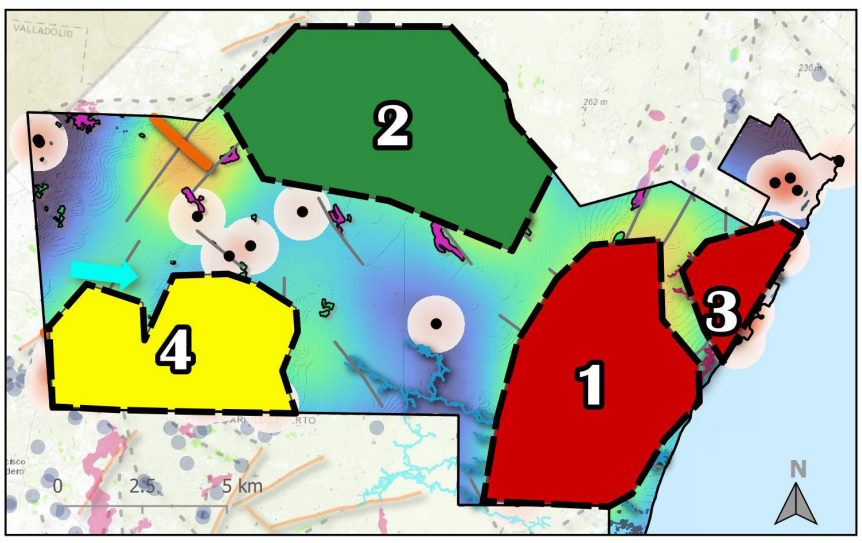
5.1.5.4. Mapa resultante de susceptibilidad y peligros a hundimientos

Poder identificar a través de la cartografía las áreas de riesgo, es clave en el desarrollo de estrategias de la gestión integral del riesgo con un enfoque de prevención, planificación del uso del suelo y vulnerabilidad del agua subterránea (Hernández, 2019; Kozliakova et al., 2019; Moreno-Gómez et al., 2019, cit. Hernández & López, 2021).

Figura 116. Figura 8 Zonificación de susceptibilidad de peligro por hundimientos para el municipio de Tulum.



5.1.5. Mapa de susceptibilidad a hundimientos



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Zonas de Hundimientos

Grados de susceptibilidad

Alto

Medio

Bajo

Fuente:

Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014); SIATL-INEGI (2018); Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018). Datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano, SGM (2020). Capa Geológica a nivel República a 1:250 000. Códigos litológicos. Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx)

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia

5.1.6. Subsidencias

Existen diferencias entre la amenaza y riesgo de subsidencias y hundimientos, los primeros son descensos lentos y paulatinos de la superficie y los segundos, movimientos verticales repentinos del suelo (Hernández & López, 2021).

La subsidencia es un fenómeno geológico que no suele ocasionar víctimas mortales, aunque los daños materiales que causa pueden llegar a ser cuantiosos (Hernández, 2019). Existen diferencias entre el peligro de subsidencia y colapsos o hundimientos, los cuales se definen como:

- **Subsidencias:** descensos lentos y paulatinos de la superficie del terreno.
- **Colapsos o hundimientos:** movimientos verticales repentinos del suelo.

Para zonas kársticas, como el municipio de Tulum, los factores físicos del terreno a considerar para la elaboración de mapas de susceptibilidad a subsidencias son la litología, el grado de karstificación, propiedades geomecánicas de los materiales, factores hidrogeológicos y climáticos. El fenómeno natural de subsidencia puede influir en la destrucción física y daños de viviendas, invasión del agua sobre las tierras bajas adyacentes al mar, cambios en el gradiente que afecta al flujo de agua, averías en tuberías de pozos de petróleo y agua, así como pérdida y filtraciones de acuíferos.

Los programas y proyectos de abastecimiento de agua no son por lo general planificados en función de la capacidad de respuesta del medio geológico. Una extracción mayor que la recarga, cuantificación difícil de calcular, origina debilidades del nivel piezométrico y merman los volúmenes disponibles (Rodríguez-Castillo & Rodríguez-Velázquez, 2006).

Por lo que se buscan fuentes alternas sin considerar efectos colaterales de la "inadecuada" explotación acuífera como la aparición de la subsidencia, que se expresa como hundimientos diferenciales del terreno. Esta se asocia comúnmente a la sobreexplotación de acuíferos, aunque no necesariamente, ya que tiene que ver más con la presencia de acuitardos[2] que con la sobreexplotación. Las velocidades de esta diferencia o pequeños "hundimientos" sobre el terreno son de varios milímetros a varios centímetros por año generando la compactación de los terrenos, proceso que va acompañado de la aparición en la superficie de fracturas algunas por su extensión son llamadas localmente "fallas" (Rodríguez-Castillo & Rodríguez-Velázquez, 2006).

La subsidencia del terreno es un riesgo natural que afecta a amplias zonas del territorio causando importantes daños económicos. Puede deberse a numerosas causas como la disolución de materiales profundos, la construcción de obras subterráneas o de galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno o la actividad tectónica.

De acuerdo con Rodríguez-Castillo & Rodríguez-Velázquez (2006) en ciudades afectadas por subsidencia es difícil discernir en qué grado la componente de la extracción de agua subterránea está induciendo los hundimientos. También señala que en el Altiplano Mexicano el número de pozos agrícolas supera hasta en dos órdenes de magnitud a los urbanos, lo que se refleja en los volúmenes extraídos. Esta extracción de agua subterránea para uso agrícola podría contribuir en la subsidencia urbana.

Específicamente para el municipio de Tulum cuyo relieve se encuentra compuesto por una losa calcárea cuya topografía se caracteriza por un físico kárstico, ligeras pendientes descendente hacia el oriente y hacia el norte hasta el nivel del mar, con un relieve ondulado en el que se alternan crestas y depresiones, conformadas por elevaciones máximas de 22 m en su parte suroeste (INEGI, 2002). Su explotación al acuífero se centra en su capital por medio de 7 pozos ubicados en la parte occidental a unos 7 km de la población y 9 km de la costa. Además, se tienen registrados 14 pozos preferentemente para uso de servicios, y para uso agrícola se tiene registrado un solo pozo (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007).

Por lo que la amenaza de subsidencia se encuentra evidente dada la solubilidad de las rocas, son frecuentes las dolinas y depresiones en donde se acumulan arcillas de descalcificación, muestran en términos generales una superficie rocosa con ligeras ondulaciones y carecen en casi toda su extensión de un sistema de drenaje superficial. Sin embargo, la circulación natural del agua en el subsuelo es controlada por la estructura geológica, por la distribución espacial de la recarga y por la posición del nivel base de descarga.

Desde la porción noroeste, se origina el flujo, el agua circula hacia el sureste y hacia el este buscando su salida. Por tal motivo, se presta especial atención en las zonas donde los procesos geoquímicos han formado conductos de disolución para conformar los denominados "ríos subterráneos" que dan origen a cavernas y domos subterráneos, las cuales atraviesan principalmente en su parte sur y el norte de la zona de estudio, cuya formación originada por la acción geoquímica del agua con el contacto de los carbonatos y bicarbonatos del subsuelo, hace que sean la parte más susceptible a subsidencias, hundimientos y contaminación (Gobierno Municipal de Solidaridad, 2007). Las investigaciones en curso han señalado que los sistemas de ríos subterráneos que se localizan cerca de la ciudad de Tulum podrían ser de los más largos del mundo, principalmente Sac Actun en la parte sur y Ox Be Ha en su parte Norte (Monroy-Ríos, 2022).

Desde el punto de vista geólogo - geofísico, las fuentes de incertidumbre para el municipio de Tulum se encuentran en el tipo y grado de evolución del relieve, el modelado de las vertientes y su forma, y la geología local que rigen la formación del escurrimiento superficial y subterráneo, el movimiento de las pequeñas laderas y el transporte y deposición de sedimentos (Molerio, 2020).

No obstante, para el municipio de Tulum la subsidencia no se presentaría por causas de obras subterráneas o galería mineras o la actividad tectónica, ni siquiera por sequía del manto acuífero, ya que son mínimas estas actividades. Sus mecanismos desencadenantes serían principalmente por: construcciones sobre cavernas y áreas kársticas. Por tal motivo, y como una de las actividades que pueden favorecer el peligro de subsidencias, se tomaron en cuenta la localización de bancos de materiales, donde la extracción se concentra en los agregados pétreos, siendo la entidad uno de los principales productores de caliza a nivel nacional (SGM, 2020).

El fenómeno de subsidencia puede acelerarse con la precipitación que se filtra al subsuelo, ya que el agua de lluvias abundantes no logra ser drenadas suficientemente rápido, por eso, esta amenaza se puede clasificar a través de dos procesos: por disolución o por erosión (Hernández, 2019; Hernández & López, 2021).

El primero, se observa cuando la concentración de roca tipo caliza, se disuelve con mayor facilidad, principalmente, por el flujo de agua de las corrientes subterráneas, pero también a medida que el agua de lluvia cae y se infiltra en el sistema de aguas subterráneas y encuentra rocas carbonatadas como la piedra caliza, puede comenzar a disolver la calcita. El segundo, se dar por el flujo de corrientes subterráneas que conlleva a la erosión de la roca caliza, es decir, al adelgazamiento de la superficie terrestre.

Este se considera el tipo más común de colapso repentino, el que rara vez destruye grandes áreas, sino que se concentra en pequeñas zonas, mucho más visibles en localidades urbanas (Nelson, 2016; Ávila-Olivera, 2006, cit. Hernández & López, 2021). Este tipo de subsidencia también se asocia a terrenos palustres y humedales que sufren de erosión natural, o donde se concentran suelos no consolidados como resultado de los sedimentos depositados por las inundaciones periódicas de arroyos y ríos, así donde existen daños estructurales por la activación de fallas.

---

2 Formación geológica capaz de almacenar agua, pero cuya conductividad hidráulica es relativamente pequeña, por lo que transmite con lentitud el agua que contiene en sus poros y la cede tan lentamente que no puede por sí misma abastecer debidamente los pozos, aunque permite una recarga de acuíferos (https://www.riego.org/glosario/acuitardo/).

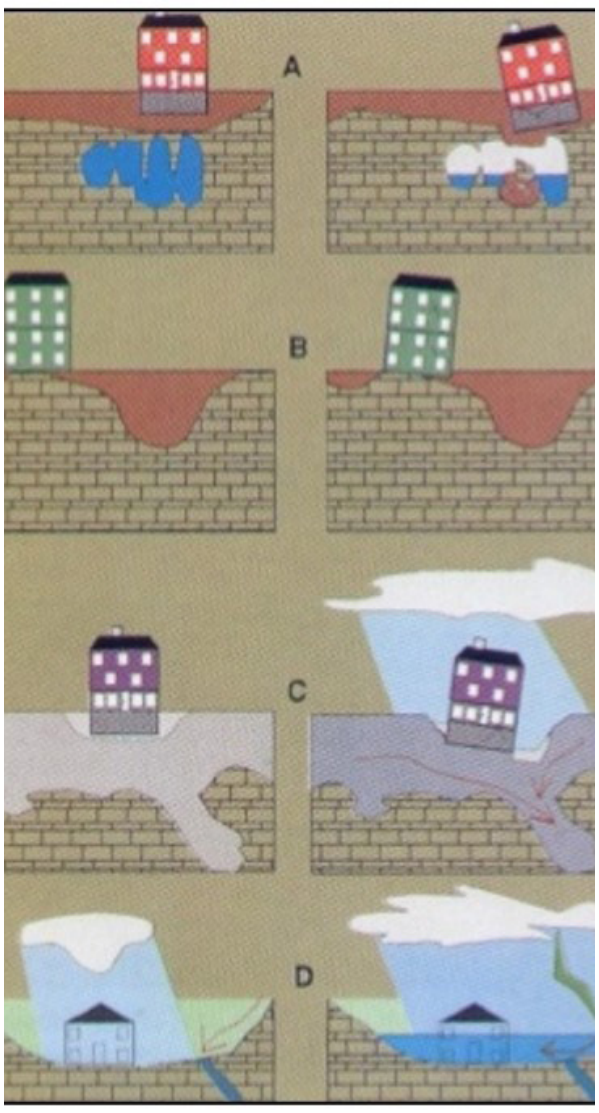
5.1.6.1. Metodología

La amenaza de subsidencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o marina. Es únicamente la manifestación de mecanismos superficiales de deformación. En cuanto a la actuación antrópica, se debe tener en cuenta la situación de labores mineras, características mecánicas de los materiales y las variaciones del nivel freático, como la sequía.

Todas estas causas se manifiestan en la superficie del terreno mediante deformaciones verticales que pueden variar desde pocos milímetros hasta varios metros durante periodos de minutos hasta años.

De acuerdo con Molerio (2020) muchas de las catástrofes provocadas por el fallo de las obras o infraestructura se deben a errores de diseño asociados a un conocimiento incompleto o impreciso de los problemas geológicos e hidrológicos del sitio, lo que se traducen en errores de proyección, construcción, operación y mantenimiento (figura 117).

Figura 117. Deformaciones verticales del terreno



A. Muestra una construcción sobre una caverna que más tarde colapsa.

B. Una pesada estructura descansa sobre roca sólida, pero es parcialmente soportada por suelo arcilloso residual blando.

C. La estructura se encuentra sobre un relleno poroso en un lugar donde el drenaje superficial y subterráneo desplaza el suelo de apoyo.

D. Muestra un área de karst donde la precipitación es captada por conductos del subsuelo, pero una fuerte precipitación no llega a ser drenada lo suficientemente rápido.

Fuente: Tomado de (Carey & Witt, 2006).

Tomás, et al. (2009) señala, citando a Prokopovich (1979), que existen, desde el punto de vista genético dos tipos de subsidencia: endógena y exógena. La primera hace referencia a aquellos movimientos de la superficie terrestre asociados a procesos geológicos internos, tales como pliegues, fallas, vulcanismos, etc. El segundo se refiere a los procesos de deformación superficial relacionados con la compactación natural o antrópica de los suelos. Algunos tipos de subsidencia que estos autores exponen se muestran en la tabla 91.

Tabla 90. Tabla 1. **Tipos de subsidencia: endógena y exógena**

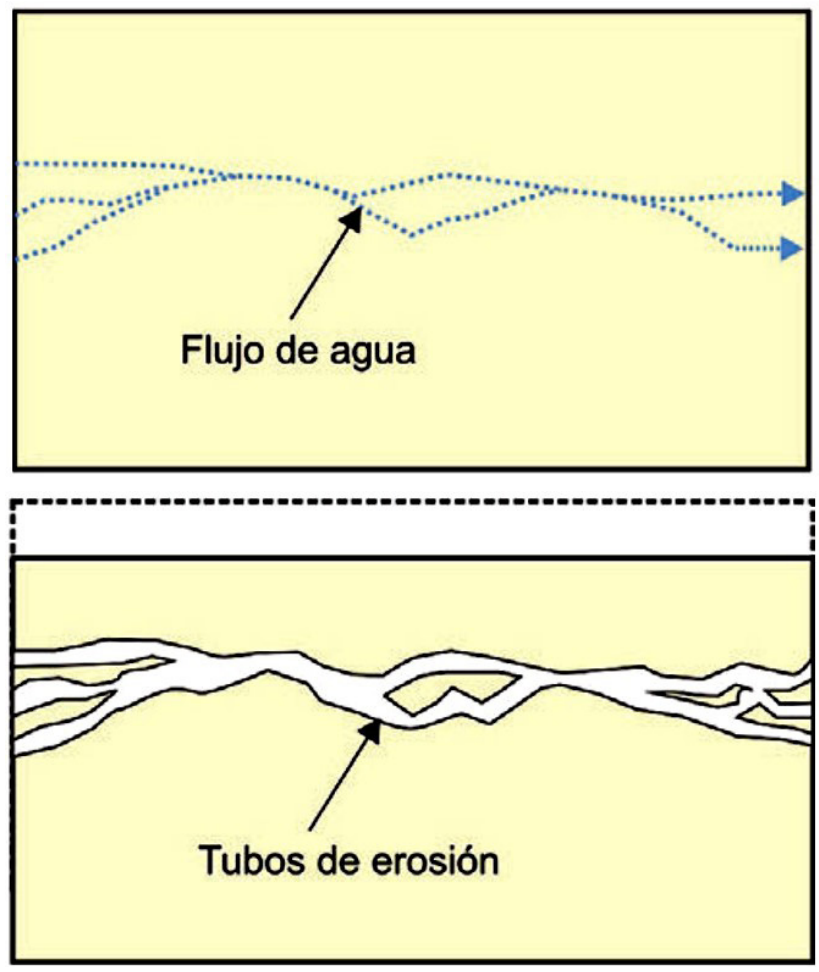
Por disolución subterránea	En sal
	En yeso
	En rocas carbonáticas
Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras	
Por erosión subterránea (tubificación o piping)	
Por flujo lateral	Rocas salinas
	Arcillas
Por compactación	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidro-compactación
Tectónica	

Fuente: Tomás, et al., (2009).

La composición litológica del municipio de Tulum con rocas carbonatadas como la piedra caliza, compuestas principalmente por el mineral de calcita ($CaCO_3$), son muy susceptibles a la disolución por el agua subterránea durante el proceso de meteorización química (Nelson, 2016 cit. Hernández & López, 2021). Asimismo, en el municipio existen afluentes hídricos, no tanto a nivel superficial, pero sí subterráneo o afluentes intermitentes, que, aunado a su litología y edafología, podrían indicar dónde existen suelos menos compactos y delgados, siendo susceptibles a deformarse por el proceso de erosión.

El agua, en su recorrido horizontal por el terreno, moviliza partículas de suelo generando una serie de canales que pueden desencadenar colapsos de terreno. El fenómeno es conocido como tubificación o “piping” (figura 118).

Figura 118. Tubificación o “piping”

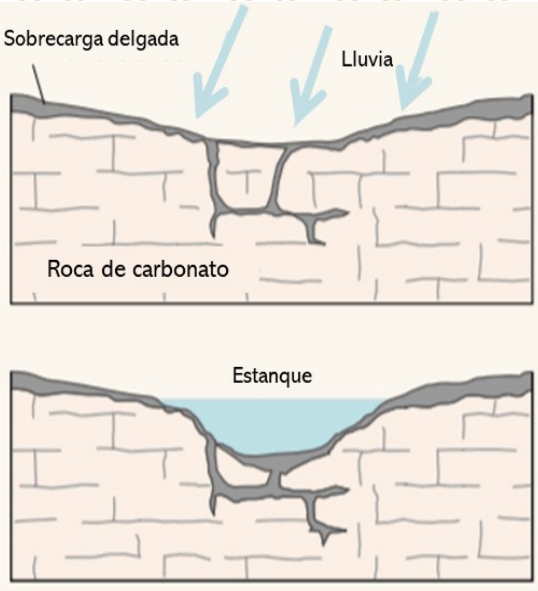


Fuente. Tomás, et al., (2009).

Como se ha comentado en párrafos anteriores, la mayor parte del suelo del municipio de Tulum está compuesto por rocas calizas de carbonato, las cuales son solubles en agua bajo determinadas condiciones pudiendo llegar a generar grandes sistemas de huecos interconectados entre sí cuya deformación, y colapso, en caso extremo, generarían una subsidencia con carácter localizado. Por otra parte, se podría presentar la subsidencia por erosión subterránea, la cual se produce por un proceso mecánico de arrastre de partículas de suelo causado por el flujo de agua subterránea.

A partir de lo anterior, se identificaron zonas de subsidencia por disolución o por erosión (figuras 119 y 120), examinando procesos interconectados contrastados con elementos geográficos naturales, como litología, edafología, morfología, hidrología, flujos subterráneos, además de la red de drenaje de las cuencas hidrográficas, la localización de los sistemas de ríos subterráneos reconocidos (Sistemas Sac Actun y Ox Bel Ha) y de los terrenos sujetos a inundación. Así como las zonas de explotación de bancos de caliza, que estén en operación o no, ya que desgastan el subsuelo, que involucra la fractura de la roca, por la extracción y trituración de esta.

Figura 119. Subsidencia por disolución

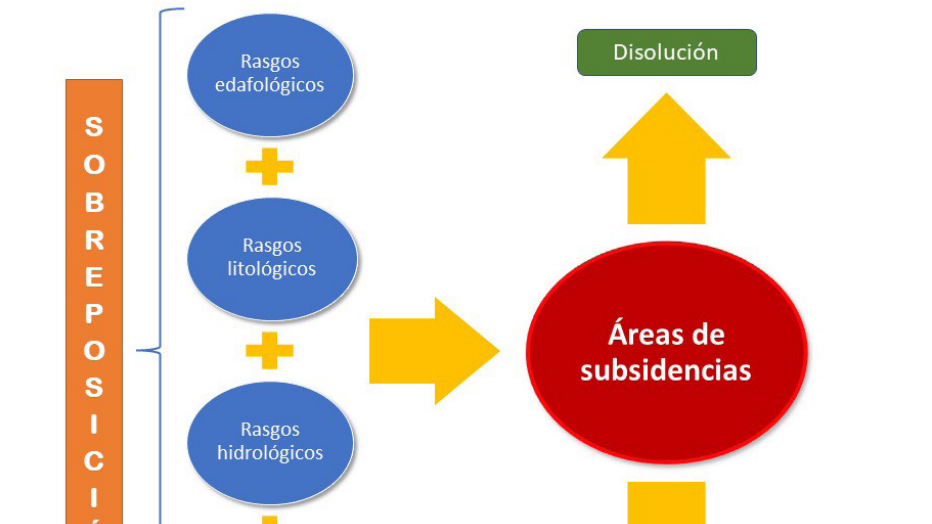


La lluvia y el agua superficial se filtran a través de las uniones de la piedra caliza. La roca carbonatada disuelta se aleja de la superficie y se forma gradualmente una pequeña depresión.

En las superficies de carbonato expuestas, una depresión puede concentrar el drenaje superficial, acelerando el proceso de disolución. Los escombros llevados a la subsidencia en desarrollo pueden obstruir el desagüe, acumulando agua y creando humedales.

Fuente: Elaborado con base en Land Subsidence in the United States, USGS (https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sinkholes).

Figura 120. Subsidencia por erosión



Fuente: Elaborado con base en Land Subsidence in the United States, USGS (https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sinkholes).

El esquema metodológico que se expresa en la figura 121 expone las dimensiones contempladas para la sobreposición de información. Entre estas están los rasgos geológicos: uvalas, poljes y dolinas más las fallas y fracturas. La litología que incluye el tipo de roca que se encuentran en el municipio: *areniscas, litosoles, caliza, coquinas, gleysoles, rendzinas, solonchak*, así como rocas lagunares y litorales. Además de la edafología de la región. Rasgos hidrológicos: cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Actividad minera: explotación de bancos de caliza, que estén en operación o no.

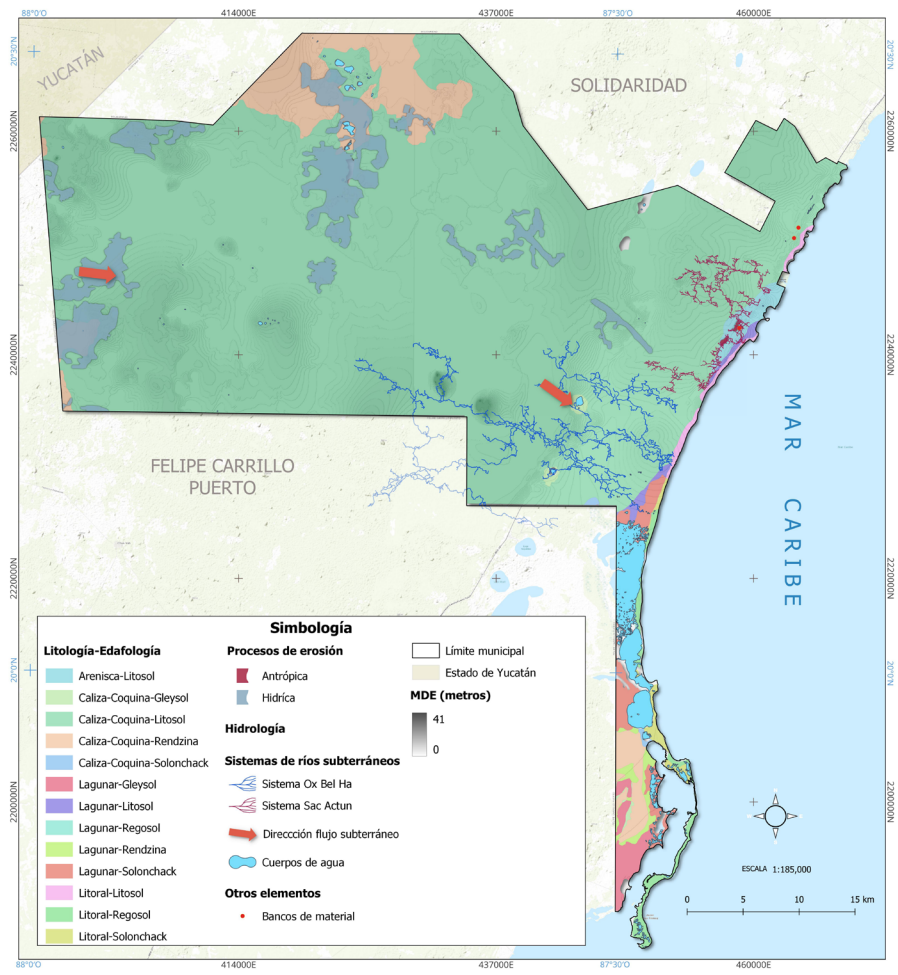
Figura 121. Esquema metodológico para la identificación de zonas de subsidencias.

Fuente: Adaptado de Hernández (2019).

5.1.6.2. Memoria de cálculo

Para obtener los resultados y delimitar las áreas propensas a subsidencias en el municipio de Tulum, se realizó un procesamiento de datos similar al realizado para la amenaza de hundimientos, sin embargo, si bien se utilizan los mismos rasgos geológicos preexistentes en el territorio (dolinas, uvalas, poljes, fallas y fracturas), además se incluyen las características geográficas de los rasgos litológicos y edafológicos, para este último se tienen los datos también de erosión del suelo. El primer resultado para este procedimiento es el mapa de rasgos edafológicos y litológicos (figura 122). A lo que se le sumo la localización de bancos de materiales como actividad de extracción minera.

Figura 122. Rasgos litológicos y edafológicos para la identificación de zonas de subsidencias.



Fuente: Elaboración propia a partir de las Cartas Topográficas del INEGI 1:50 000.

Por otro lado, con relación a los rasgos hidrológicos, se incluyen datos de dirección de flujos subterráneos, además de la red de drenaje de las cuencas hidrográficas, las cuales fueron calculadas por medio del Modelo Digital de Elevación del municipio y las zonas susceptibles a inundación.

Con esta elección de elementos naturales más el impacto antropogénico de la actividad minera y la erosión hídrica del suelo, se resaltaron las áreas vulnerables.

Las delimitaciones de las zonas de peligro al fenómeno de subsidencia se derivaron a partir de dos clases: por disolución y erosión.

Sobre el marco de un Sistema de Información Geográfica se aplicó una aproximación metodológica empleando geoprocesos de superposición y el análisis de mapas, se sobrepusieron las siguientes capas vectoriales:

- Rasgos edafológicos
- Erosión del suelo
- Rasgos litológicos
- Rasgos hidrológicos
- Direcciones de flujo subterráneos
- Bancos de material

Dando como resultado final el mapa de susceptibilidad a subsidencias para el municipio de Tulum (figura 123).

5.1.6.3. Resultado análisis

En la figura 123, se pueden advertir las siete zonas identificadas como susceptibles al fenómeno de subsidencia para el municipio de TULUM: tres por disolución subterránea y cuatro por erosión.

La subsidencia por disolución se da, principalmente, por la acción de las aguas subterráneas que genera la karstificación, especialmente en rocas extremadamente solubles como evaporitas y carbonatos. Para este fenómeno se identificaron tres zonas por disolución, cerca del litoral y sobre los sistemas de ríos subterráneos, de la misma manera se localizan áreas de inundación y suelos compuestos de areniscas. Cabe recordar que es una región compuesta en su mayoría de roca sedimentaria caliza, con gran flujo de agua subterránea y una red de drenaje con varios afluentes, los cuales hacen su aparición en la época de lluvias, alrededor de seis meses al año, lo que contribuye a este proceso de disolución.

Esta transformación tiene lugar a medida que el agua se mueve a lo largo de fracturas y otras divisiones o aberturas en la roca. Esto da como resultado la disolución de gran parte de la piedra caliza si la reacción continúa durante un largo período de tiempo. Se observó que las zonas de disolución corresponden a donde se concentra la red de drenaje y suelos compuestos de caliza con elementos geológicos, como los lineamientos estructurales y fallas.

Las zonas punteadas en color color (1, 2 y 3) corresponden a subsidencia por disolución, como se ha señalado y que se observan en el mapa-figura 16, la mayor parte del municipio se compone de roca de carbonato de calcio la cual se disuelve con mucha facilidad, principalmente por el flujo de agua de las corrientes subterráneas. Las dos primeras coexisten con flujos subterráneos (Sistemas Ox Bel Ha y Sac Actun) y lineamientos geológicos, bancos de material fuera de operación, así como alta densidad de dolinas. De éstas, destaca la zona 3 al suroeste del municipio, su litología se compone de roca caliza coquina, compuesta de agregados no consolidados, poco cementados, formadas de conchas, esqueletos de corales y fragmentos de estos, que han sido fracturados mecánicamente por procesos naturales, entre ellos la sedimentación. Cuando su resistencia mecánica no es suficiente para soportar el peso de la cobertura, este se fragmenta y se agrieta subsidiendo la cobertura terrestre por flexión o colapso en función de que ésta se comporte de forma dúctil.

La acción del agua de lluvia y de la costa del litoral (especialmente cuando se encuentra acidulada por el ácido carbónico) provoca su disolución, creando un tipo de meteorización característica denominada kárstica. Encontrándose también roca litoral y lagunar las cuales pueden ser modificadas por distintos aspectos: físicos, químicos y/o biológicos.

En la misma figura 123, también se observa en color amarillo las cuatro zonas identificadas con susceptibilidad a subsidencia por erosión subterránea. Para identificar estas zonas se tomaron en cuenta las depresiones kársticas (cenotes, úvalas y poljes) identificadas por Fragoso-Servón, et, al. (2014), los lineamientos geológicos, el tipo de roca, las áreas de erosión hídrica, además de la red de drenaje identificada.

En la zona 1, al Sureste del municipio, se observa como la de mayor área de subsidencia por erosión, al incluir dentro de sus límites formas kársticas como poljes y uvalas, fracturas, zonas de inundación y una gran extensión de erosión hídrica.

Le sigue la zona 2, más hacia el Noreste del municipio, donde de la misma manera se advierte una gran área de polje (aproximadamente 30 km2), así como una zona de erosión hídrica y lineamientos geológicos. Lo que puede corresponder a depresiones cerradas generadas por subsidencia kárstica sedimentaria, a partir de un ambiente palustre, es decir, compuesta de sedimentos con un alto porcentaje de materia orgánica producto de la descomposición de plantas y organismos.

Por su parte, en la zona 3, en la esquina Suroeste del municipio, concentra una alta densidad de dolinas, se observan alrededor de 78 cenotes a cielo abierto, además de existir a su interior áreas de erosión hídrica y algunas depresiones kársticas como poljes y uvalas, así como lineamientos geológicos de gran longitud.

La ultima zona identificada es la 4, la cual se ubica al Noroeste del municipio, un área de poca extensión territorial, sin embargo, en ella se localizan zonas de erosión hídrica, lineamientos y fracturas geológicas, el afluente de mayor extensión de la red de drenaje, y es coincidente con poljes en zona de inundación, esto se debe a que esta depresión kárstica puede llegar a inundarse en forma temporal (o permanente, convirtiéndose en lago), es si el agua acumulada supera la capacidad de desahogue del ponor y de las grietas y sumideros que se encuentran en su recorrido, o si el nivel de las aguas subterráneas se eleva.

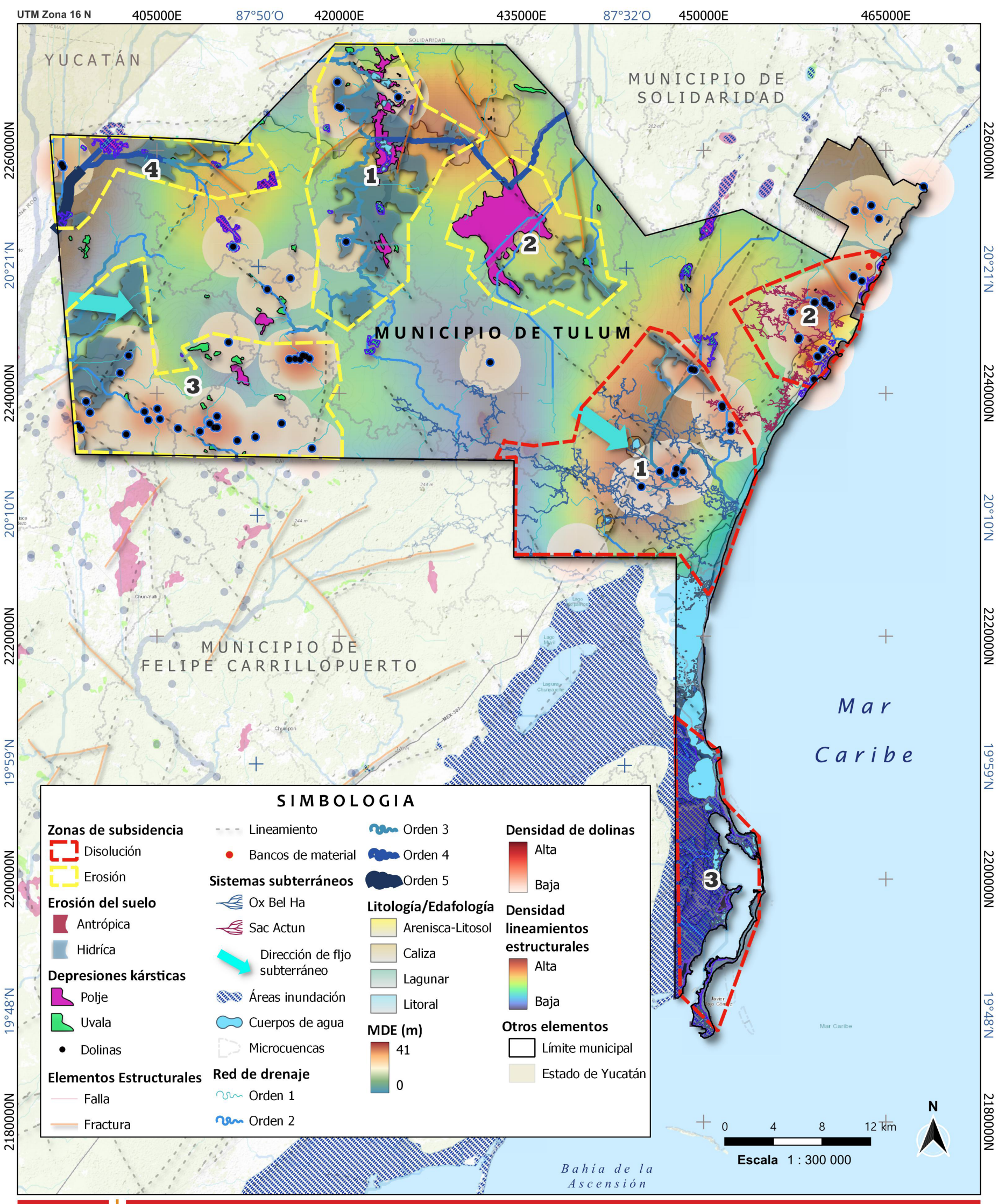
Finalmente, podemos señalar que en el municipio de Tulum el fenómeno de subsidencia es favorecida por el adelgazamiento de la superficie terrestre y el flujo de corrientes subterráneas, lo que conlleva la disolución de la roca caliza presente en toda su superficie.

5.1.6.4. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados

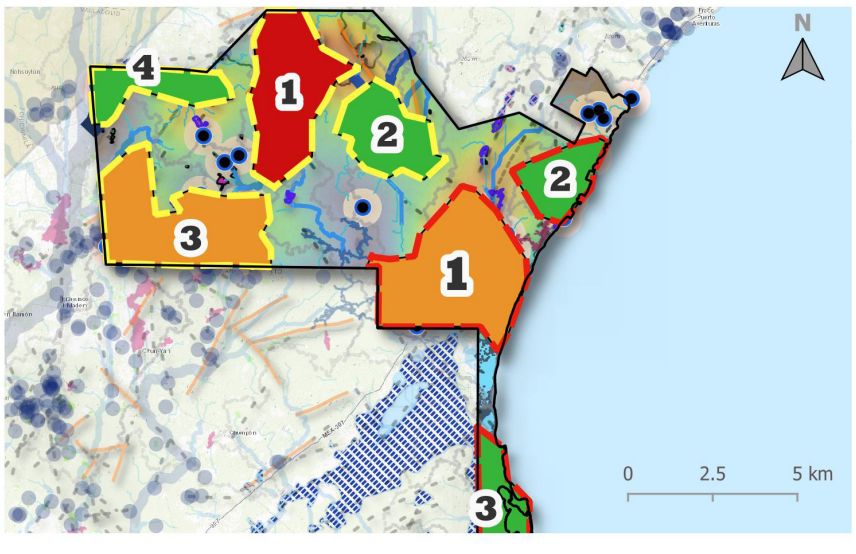
La sobreposición de las variables del entorno físico dio como resultado principal la cartografía de peligro a subsidencia (Figura 123). No debemos olvidar que los riesgos geológicos se consideran un parámetro integral para el cálculo del daño probable causado por los procesos geográficos naturales o por la carga antropogénica en los territorios específicos, y también para la infraestructura urbana ya existente o para futuras construcciones planificadas (Menezes, et al., 2020; Kozliakova et al., 2019, cit. Hernández&López, 2021).

Se debe tener en cuenta que, el fenómeno de subsidencia kárstica en las depresiones de fondo plano posee una gran relevancia desde el punto de vista aplicado por los riesgos derivados de su funcionalidad actual. La generación de dolinas por colapso ocasiona graves problemas en las redes de comunicación y de irrigación, así como cuantiosas pérdidas económicas (Gutiérrez y Arauzo, 1997).

Figura 123. Mapa de Zonificación de susceptibilidad de peligro por subsidencia para el municipio de Tulum.



Mapa de susceptibilidad a subsidencias



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Subsidencia
- Disolución
- Erosión

Grados de suseptibilidad
- Muy alta
- Alta
- Media

Fuente:

Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014); SIATL-INEGI (2018); Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018). Datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano, SGM (2020). Capa Geológica a nivel República a 1:250 000. Códigos litológicos. Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx)

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia

5.1.7. Agrietamientos

Una grieta se define como una ruptura longitudinal de las rocas o el hielo, sin desplazamiento de las porciones que separa, las cuales pueden ser de origen tectónico y no tectónico: intemperismo, compactación, desprendimiento, deslizamientos, etc. (Lugo, 2011).

Para el Instituto Politécnico Nacional [IPN] (s.f.) los agrietamientos geológicos se manifiestan por una serie de grietas en el suelo que se profundizan hacia el subsuelo. Tienen forma alargada y abertura variable de unos pocos a varios centímetros. El conjunto de grietas puede adquirir una forma lineal que puede extenderse por cientos de metros a pocos kilómetros. Suelen manifestarse junto a los fenómenos de hundimientos o socavones, colapsos, corrimientos de tierra y oquedades. Lo anterior, se transmiten a las edificaciones generando cuarteaduras en su estructura y desplomes. De aquí la peligrosidad de este fenómeno en las zonas urbanas.

Las grietas de desecación (poligonales) se forman al desecarse y compactarse los lodos arcillosos o calcáreos ricos en agua de infiltración, es decir, el suelo se compacta al perder agua y humedad en los periodos de sequía, afectando principalmente a suelos arcillosos, dando lugar a grietas de hasta 4 cm de anchura y 1 m de profundidad (figura 124).

Este fenómeno se ve acrecentado cuando se asocia con la práctica de la extracción excesiva de agua del subsuelo, ya sea para uso agrícola, industrial o de agua potable. De la misma forma, se asocia también con la litología aluvial, palustre y lacustre o proximidades de los ríos, lagos, lagunas o esteros.

En la Península de Yucatán y específicamente en el municipio de Tulum, gracias a la abundante precipitación pluvial y a las características topográficas y geológicas del estado de Quintana Roo, el volumen renovable del acuífero es superior a las demandas generadas en todos los usos, inclusive las esperadas a mediano y largo plazo, por lo que este fenómeno no se presentaría al corto plazo por la extracción excesiva de agua potable.

Las grietas, también pueden producirse por sismos, su estudio se emplea para evaluar las características e intensidad de los eventos. Sin embargo, para el municipio de Tulum el fenómeno de sismos es mínima su presencia, los ocurridos son de baja intensidad, por lo que no se consideran como causa de agrietamientos (figura 124).

Figura 124. Ejemplos de agrietamiento.



Por otra parte, las grietas que se producen por eventos volcánicos también han sido motivo de estudio, pues ellas dan indicio de características de los flujos y de los materiales que los conforman, además resulta indispensable considerarlas en los mapas de amenaza volcánica. Un evento volcánico tampoco sería el origen principal de agrietamientos en el territorio.

Resulta difícil predecir con certeza aspectos como el punto de inicio de una grieta, su dirección y profundidad, su interrelación con otras grietas verticales y horizontales, los efectos de las condiciones de contorno en el agrietamiento, el comportamiento ante ciclos de humedecimiento y secado, la velocidad de avance horizontal y vertical, etc. (figura 124).

Como ya se mencionó, en el caso de los agrietamientos por subsidencia, la causa principal es la desecación por extracción de agua subterránea, aunque también en ocasiones la presencia de estructuras geológicas profundas, como son fallas o contactos litológicos en zonas que sufren subsidencia, las cuales crean deformaciones no uniformes y se manifiestan superficialmente como discontinuidades, escalones y grietas.

5.1.7.1. Metodología

La generación y factores del fenómeno de agrietamientos sucede principalmente por tensión en el subsuelo que propicia la abertura de tierra. La cual puede ser generada por:

- Subsidencia del subsuelo.
- Aceleración de la subsidencia por extracción de agua subterránea.
- Un lento y variable corrimiento de tierra, que a la vez es controlado por otros factores.

En la mayoría de los casos de agrietamientos tienen gran influencia de la estructura del subsuelo. Se han identificado los factores que controlan los agrietamientos geológicos. Se pueden conjuntar los siguientes con los ya listados de manera variada (IPN, s.f.):

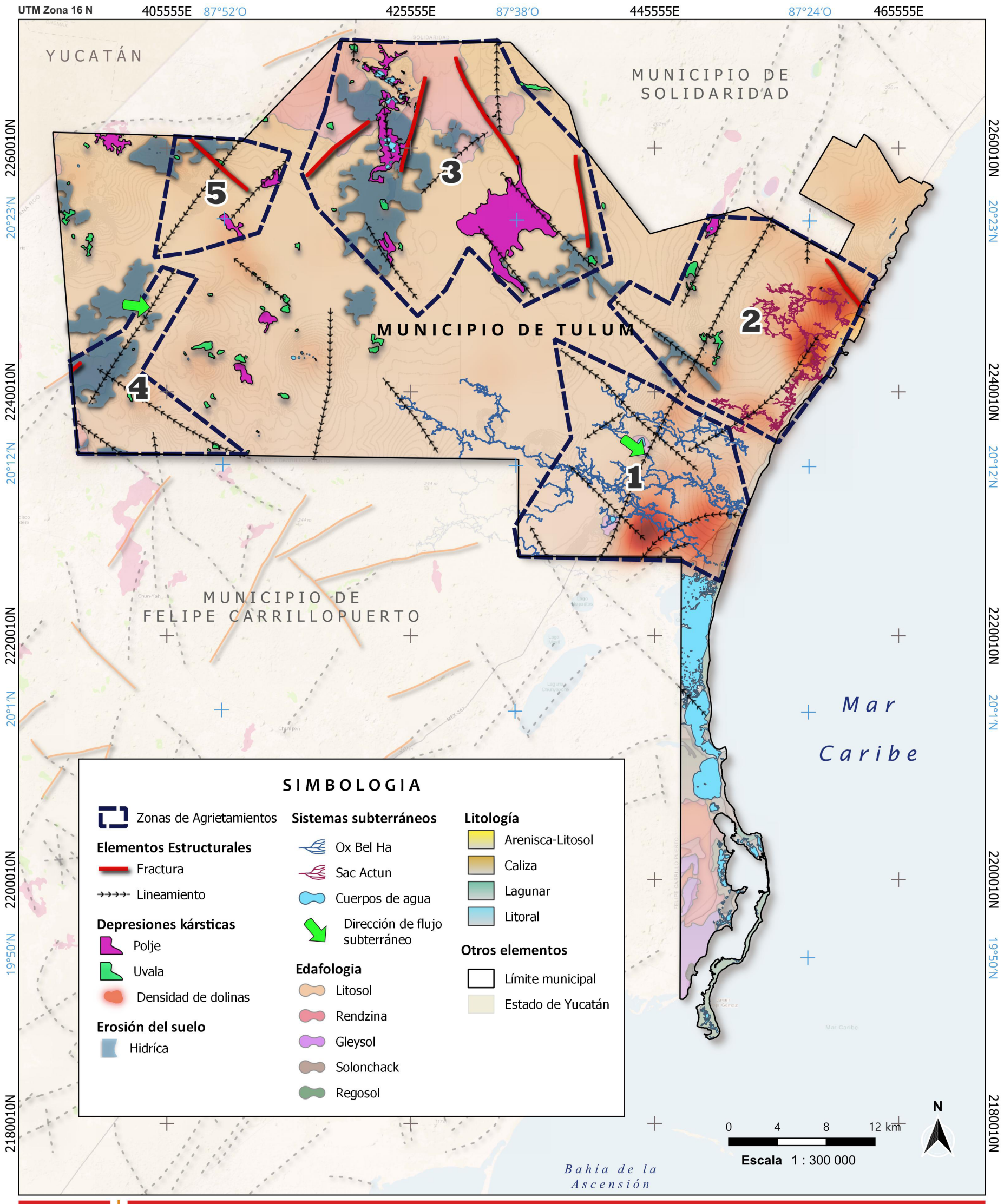
- Subsuelo de baja consistencia mecánica (a partir de la zonificación de valores de velocidad de ondas sísmicas).
- Contenido de agua en el subsuelo (a partir de tomografía geoeléctrica y sondeos eléctricos verticales).
- Existencia de una capa firme o roca dura en el subsuelo (A partir de exploración sísmica).
- Infiltración de agua en el subsuelo (A partir de análisis geohidrológico combinado con superficie de capa firme).

Por lo anterior resulta muy importante combinar metodologías geológico-geofísicas en el estudio de agrietamientos. Según lo explicado, es fundamental contar con un método efectivo de exploración sismológica para deducir la capa firme o dura del subsuelo.

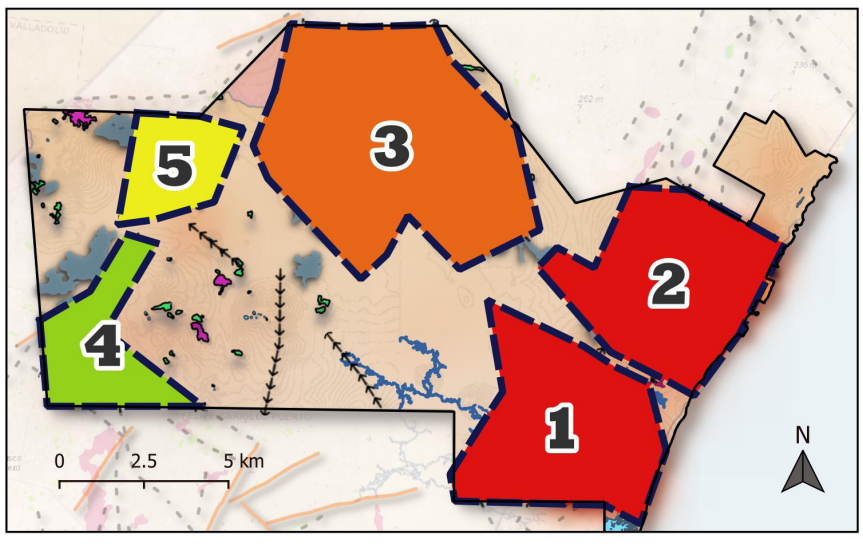
De acuerdo con lo anterior, la naturaleza geológica y el proceso hidrológico, son claves para el desarrollo del agrietamiento. Los depósitos aluviales son el lugar idóneo para la ocurrencia de esfuerzos horizontales (sin naturaleza tectónica). La importancia de este tipo de procesos dentro del terreno municipal radica en que la grietas (fracturas), generalmente discontinuas, ya que facilitan la filtración de agua aumentando la formación de cavernas que vulneran el terreno produciendo condiciones propicias para el hundimiento o colapso del suelo.

Para el análisis, caracterización y evaluación de los niveles de riesgo por agrietamiento para el municipio de Tulum, se tomaron en cuenta las zonas de subsidencia identificadas, dándole mayor énfasis al tipo de suelo, el proceso hidrológico y su naturaleza geológica. De lo anterior se identificaron 5 zonas susceptibles de riesgo (figura 125).

Figura 125. Mapa de Susceptibilidad de la amenaza de agrietamientos en el municipio de Tulum.



Mapa de susceptibilidad a agrietamientos



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Zonas de Agrietamientos

Grado de susceptibilidad

- Muy alto
- Alto
- Medio
- Bajo

Fuente:

Cartas Geológicas INEGI (2019); Fragoso-Servón, et al. (2014); SIATL-INEGI (2018); Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018). Datos vectoriales del Servicio Geológico Mexicano, SGM (2020). Capa Geológica a nivel República a 1:250 000. Códigos litológicos. Atlas Nacional de Riesgo, (http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia

5.1.7.2. Memoria de cálculo

Para identificar las áreas propensas a la amenaza de agrietamientos se tomó en cuenta, en primer lugar, los elementos estructurales (fracturas y lineamientos geológicos) y las formas del relieve (depresiones kársticas), calculando la densidad de dolinas identificadas por Fragoso-Servón, et. al (2014), CONAGUA, May (2023) y Amigos de Sian Ka'an. De la misma manera, se identificó el tipo de roca y suelo, cuerpos de agua, dirección de flujo y sistemas de ríos subterráneos.

Los agrietamientos son indicadores morfodinámicos y precedentes a fenómenos como asentamientos diferenciales en viviendas, centro educativos y obras de infraestructura básica y hundimientos de suelo, además que pueden afectar terrenos de cultivo. Dentro del área donde se producen los agrietamientos, se observa que la apertura de los suelos no es uniforme, ciertas zonas sufren mayor deformación que otros (Dávila & Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2002).

La litología principal del municipio de Tulum es roca caliza-coquina, la cual cubre casi el 95%. La coquina, es un material fosilífero, sedimentario, que varía en su grado de dureza; su retención de agua depende de su cantidad y tamaño de poros (Estrada-Medina, Valdez, Zanatta, 2008). Estos mismos autores señalan que a coquina suave es menos resistente, esta característica se debe a que se encuentran a una profundidad de 5 a 9 m, lo que hace que almacene más agua y no se filtre, en su interior contiene algunos tipos de fósiles (conchas, caracoles), por lo que presenta mayor fragilidad. Asimismo, cerca del litoral se localiza areniscas combinadas con litosoles, que cuando pasan periodos de sequía se forman grietas anchas y profundas.

A partir de los anterior y de la sobreposición de las capas de información se identificaron cinco zonas susceptibles a la amenaza de agrietamientos. La primera zona se ubica al Sureste del municipio, donde se ubican la capital del municipio en la cual existen sistemas de corrientes de agua subterráneas y una alta densidad de dolinas y gran longitud de lineamientos geológicos, con suelos de calizas-coquinas.

La segunda zona, se localiza cercana a la primera, contiene a su interior el sistema de ríos y cavernas subterráneas Sac Actun al Noreste del municipio, la cual también tiene una alta densidad de dolinas y además cuenta con areniscas y litosoles en su tipo de suelo, así como fracturas y lineamientos geológicos.

La tercera zona, la mayor en extensión, se localiza al centro norte del municipio, contiene a su interior la mayoría de las fracturas identificadas en el municipio, áreas extensas de erosión hídrica y poljes, así como lineamientos geológicos. Se encuentran edafología de rendzinas, los cuales son suelos arcillosos y poco profundos -por debajo de los 25 cm- pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Las grietas pueden aparecer en los períodos de alternancia entre humedad y sequía, es decir al compactarse el suelo y dejar de estar húmedos se agrietan.

Las zonas cuatro y cinco son más pequeñas, con menos localidades a su interior, sin embargo, cuentan con extensos lineamientos geológicos, fracturas y zonas de erosión hídrica.

No obstante, de esta primera identificación, se hace necesario que se consideren estudios específicos donde se incluya la exploración geológica, geofísica y geotécnica en campo, para comprobar y determinar de manera correcta las zonas señaladas e identificar con mayor exactitud la población o bienes expuestos.

5.2. Fenómenos astronómicos

El Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), tiene por objetivo principal el proteger la vida de las personas, principalmente, ante la eventualidad de los riesgos y peligros que representan los fenómenos perturbadores y la vulnerabilidad en el corto, mediano o largo plazo.

Entre los grupos en que se clasifican estos fenómenos, se encuentra los Fenómenos Astronómicos. De acuerdo con DGPC (2020) y la Ley General de Protección Civil (2012) se pueden definir como procesos o propiedades a los que están sometidos los objetos del espacio exterior incluidos estrellas, planetas, cometas y meteoros. Los cuales pueden interactuar con la tierra, ocasionándole situaciones que generan perturbaciones que pueden ser destructivas tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre, entre ellas se cuentan las tormentas magnéticas y el impacto de meteoritos.

De tal manera que, como se señala, en la Ley General de Protección Civil (DOF, 2012), se incorporaron los denominados Fenómenos Astronómicos, a la fenomenología en protección civil, los cuáles son definidos según el artículo 2, fracción XXI, como "aquellos eventos, procesos o propiedades a los que están sometidos los objetos del espacio exterior incluidos estrellas, planetas, cometas y meteoros. Algunos de estos fenómenos interactúan con la tierra, ocasionándole situaciones que generan perturbaciones que pueden ser destructivas tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre, entre ellas se cuentan las tormentas magnéticas y el impacto de meteoritos".

Los fenómenos astronómicos son generadores de potenciales riesgos y que éstos se traducen en daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador. Considerados riesgos potenciales.

Antecedentes de fenómenos astronómicos en México.

En 2013, un estudio de Lloyds of London predijo que las tormentas climáticas espaciales más extremas podrían afectar a millones de personas, causar muchas pérdidas económicas y además se estima que la recuperación demoraría hasta dos años (Barragán, s.f.).

El clima de la Tierra es primeramente una manifestación de cómo la radiación solar es absorbida, distribuida en el sistema atmósfera–océano, que posteriormente es irradiada hacia el espacio exterior. La composición atmosférica incide directamente en el balance global de energía, ya que sus componentes reflejan o absorben la radiación solar proveniente del espacio, así como la radiación térmica emitida por la superficie terrestre en diferentes formas (Mora, 2020).

A través de la historia documentada en México ha habido distintos fenómenos de origen astronómico. Desde años atrás se tiene presente el impacto del asteroide de Chicxulub ocurrido hace 66 millones de años que generó un cambio global en el clima y en la biótica, para el caso de efectos del clima espacial debido a la actividad del Sol, mucho se ha hablado de la mayor tormenta solar de la que se tiene registro en la historia de la humanidad, bautizada como Evento Carrington. Este fenómeno, que tuvo una duración de 5 minutos y después se constataría que se trató de la mayor erupción solar, de la que se tiene registro hasta nuestros días.

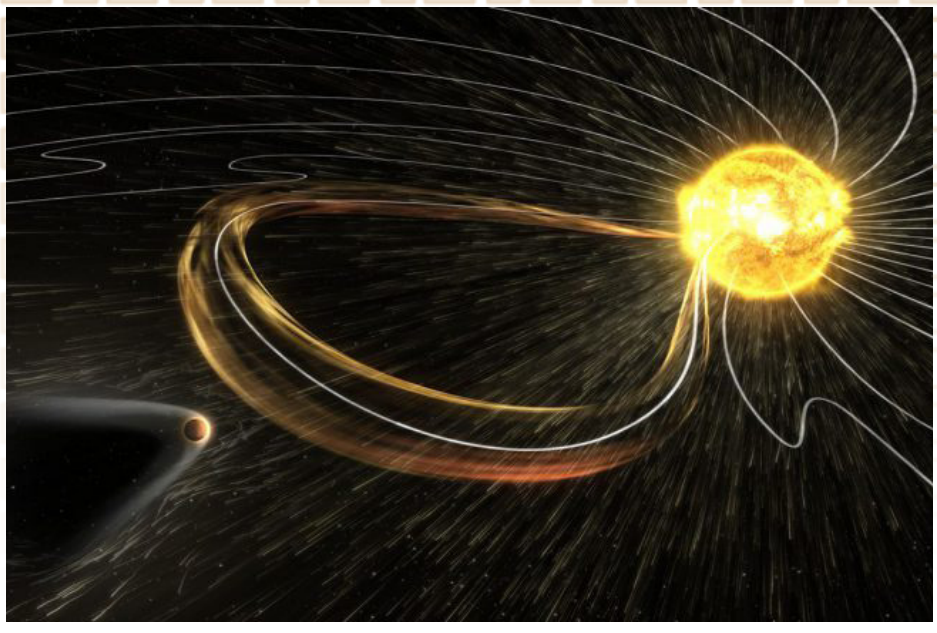
En México hay un trabajo importante que han realizado conjuntamente por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y el Laboratorio Nacional de Clima Espacial (LANCE) de la Universidad Nacional Autónoma de Mexico, UNAM. Actualmente se cuenta con el Servicio de Clima Espacial-México (SCiESMEX) que cuenta con el Monitoreo del clima espacial y Servicio de alerta con un boletín de Clima Espacial (Barragán, s.f.).

Perturbaciones astronómicas

Entre las principales amenazas se encuentran las tormentas magnéticas o geomagnéticas (figura x), que inciden en cambios relativamente sutiles asociados con el clima espacial, y afectan las telecomunicaciones de señales de satélites o instrumentos GPS (Global Position System) en la tierra (Mansilla, 2013).

Por otra parte, también pueden verse afectada la red eléctrica causando grandes pérdidas económicas. Las perturbaciones del campo magnético de la Tierra generadas por el ciclo solar pueden causar pérdidas económicas en diferentes sectores productivos, como sucedió el día 13 de marzo de 1989 cuando se produjo un gran apagón en Quebec (Canadá) con cerca de cinco millones de afectados y pérdidas de unos doce millones de dólares (Tech, 2017).

Figura 126. Tormenta geomagnética.

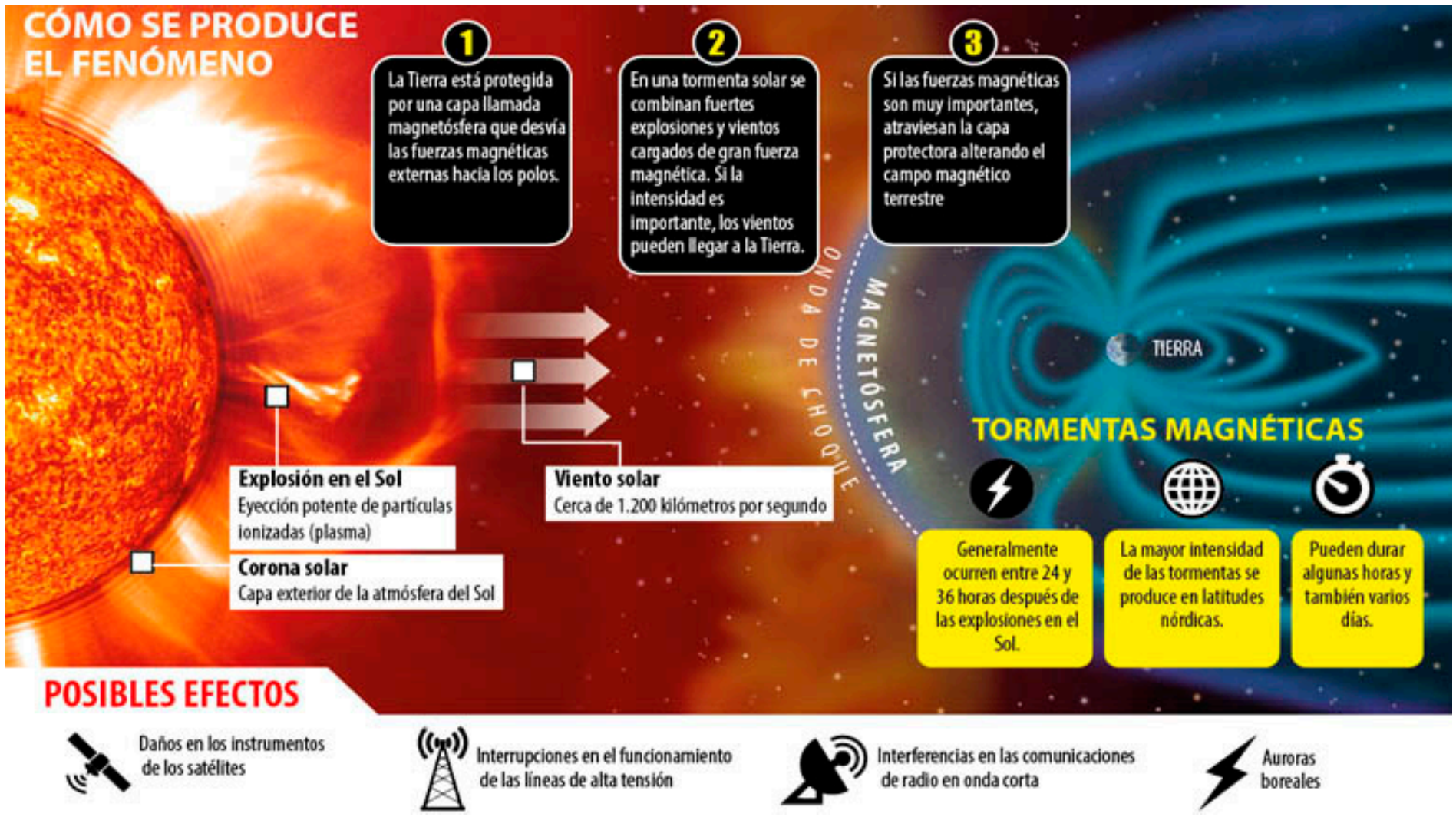


Fuente: https://nuestroclima.com/los-humanos-y-las-tormentas-magneticas/

De acuerdo con Tech (2017) cuando el viento solar cargado de partículas interacciona con el campo magnético de la Tierra se origina una tormenta geomagnética que es capaz de generar en el subsuelo unas corrientes eléctricas inducidas geomagnéticamente (GIC) y que son peligrosas para las redes eléctricas y los sistemas conductores (oleoductos, gasoductos, líneas de ferrocarril y otros). Estas corrientes, que son de baja frecuencia y se comportan como corriente continua, dependen de la estructura geoeléctrica de la región, de la geología regional y de la conductividad eléctrica de las rocas (figura 127). No obstante, un resplandor solar de una intensidad alta, si bien no supone un peligro a las personas gracias a la acción de la atmósfera, puede llegar a interferir con los objetos situados en la órbita terrestre, como los satélites responsables, entre otros, de las conexiones GPS (AFP, 2017).

Para el municipio de Tulum, con litología principalmente compuesta de piedra caliza, lo que debe tomarse en cuenta, si se observa un incremento en las temperaturas producidas por una tormenta geomagnética es su conductividad térmica. Teniendo en cuenta, que las características de transferencia de calor de un material sólido se miden mediante una propiedad llamada conductividad térmica, k (o λ), medida en W / mK, medida de la capacidad de una sustancia para transferir calor a través de un material por conducción. La conductividad térmica de la piedra caliza es de 1.3 W / (m · K).

Figura 127. Cómo se produce una tormenta geomagnética



Fuente: https://www.lostiempos.com/sites/default/files/media_imagen/2017/9/7/b.jpg

Otra amenaza astronómica para tomar en cuenta es el impacto de meteoritos. Las caídas de meteoritos han provocado profundas transformaciones geológicas y biológicas (figura 127). La base de datos de impacto terrestre (EID) comprende una lista de estructuras de impacto confirmadas de todo el mundo. Hasta la fecha, hay 190 estructuras de impacto confirmadas en la base de datos (figura 128). La base de datos fue concebida en su forma más temprana cuando el Observatorio Dominion, Ottawa, bajo la dirección del Dr. Carlyle S. Beals, inició una búsqueda sistemática de cráteres de impacto en 1955.

Meteoro es el nombre científico de una estrella fugaz: que se puede definir como luz emitida en forma de fragmentos, generalmente bastante pequeños, de material cósmico que a veces vemos por la noche, ardiendo en lo alto de la atmósfera terrestre.

Algunos asteroides son muy grandes y causarían una enorme destrucción si alguno golpeara la Tierra, pero su población estimada en nuestro Sistema Solar es bastante pequeña y se cree que más del 90% de estos han sido descubiertos. Ninguno de estos presenta ningún riesgo de impacto actualmente (ESA, 2018).

Figura 128. Mapa de los cráteres de impacto confirmados en la Tierra

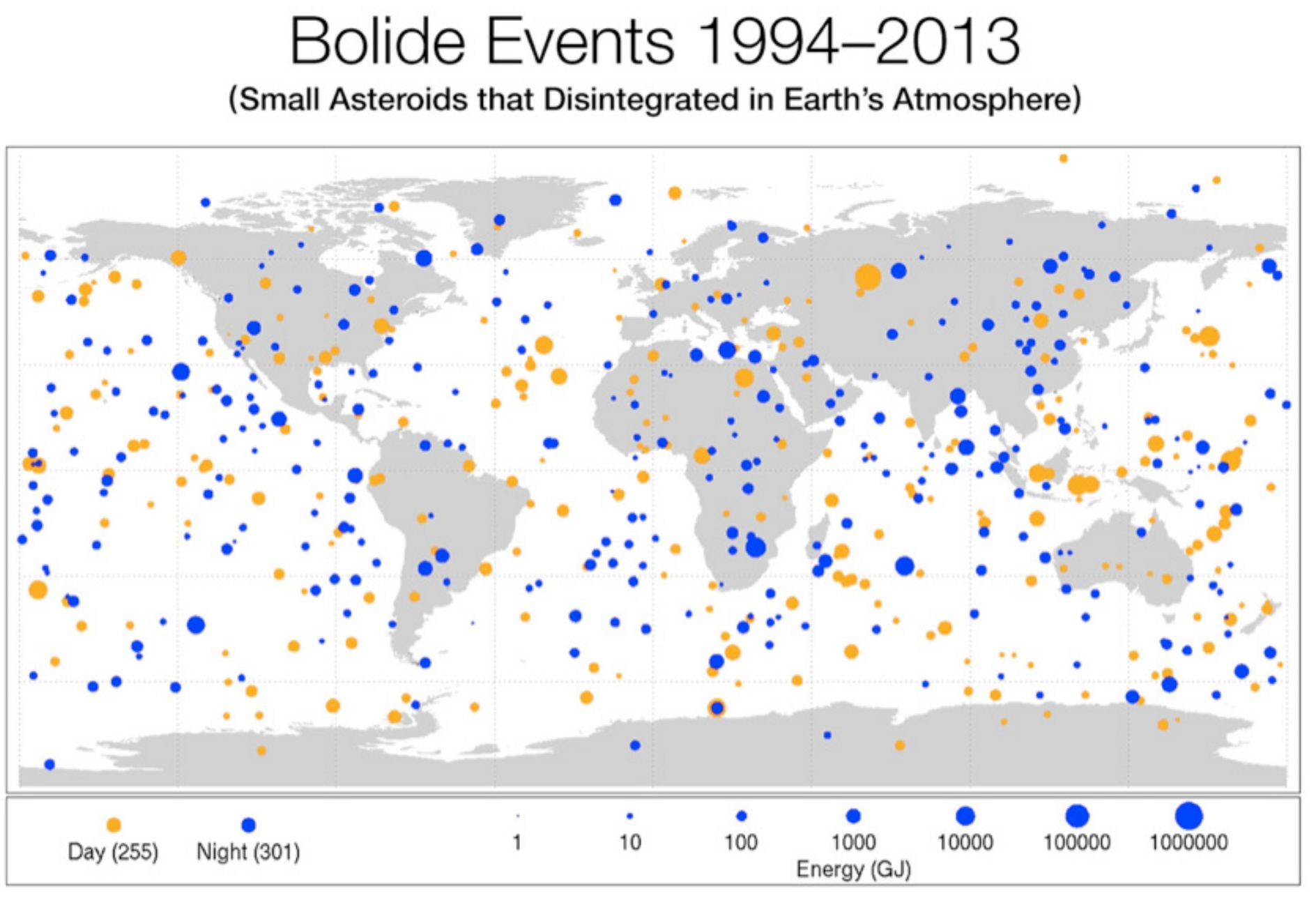


Fuente: Imagen: Passc (https://www.xataka.com/espacio/recorrido-visual-mayores-crateres-impacto-cicatrices-que-meteoritos-dejan-tierra).

El principal desafío proviene de la población de objetos de tamaño mediano, que van desde decenas a cientos de metros de diámetro. Hay muchos de estos asteroides, y la mayoría aún no se han visto. Cualquier impacto de uno de estos realmente podría dañar una ciudad o un área poblada. Pero si se descubren lo suficientemente temprano, su punto de impacto podría estimarse con un buen grado de precisión y se podrían tomar medidas para proteger a las personas (ESA, 2018).

Por otro lado, la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) define a los cráteres de impacto o astroblemas como el resultado del impacto de un objeto —asteroide o meteorito, por ejemplo— contra la superficie de otro sólido de mayor tamaño, como un planeta o una luna. Señala también que alrededor de una vez cada 5,000 años un objeto del tamaño de un campo de fútbol impacta contra la Tierra ocasionando daños de mayor extensión. La NASA ha elaborado un diagrama (figura 129) con datos recabados entre 1994 y 2013 de pequeños asteroides que golpearon la atmósfera terrestre. La imagen recoge la ubicación de los impactos de objetos de entre 1 y 20 metros y los identifica en función de si cayeron de día o noche.

Figura 129. Eventos de asteroides 1994-2013



Fuente: https://www.xataka.com/espacio/recorrido-visual-mayores-crateres-impacto-cicatrices-que-meteoritos-dejan-tierra.

Si bien, como señala Prego (2022) la meteorización y los procesos geológicos se han encargado de borrar la mayoría de los cráteres de impacto, sin embargo, la superficie de nuestro planeta sigue presentando socavones sorprendentes y de diferentes tipos. Por ejemplo, en la Tierra los científicos diferencian entre estructuras simples, de hasta cuatro kilómetros de diámetro, con rocas de borde levantadas que rodean una depresión con forma de cuenco; y estructuras complejas, de 4 o más kilómetros de diámetro. Se muestran algunos ejemplos significativos en las imágenes siguientes:

Cráter Lonar



Situado en la India, más concretamente en la meseta de Deccan, una enorme llanura de roca basáltica volcánica que dejaron las erupciones registradas hace 65 millones de años. e cree que es fruto del impacto de un meteorito hace entre 35.000 y 50.000 años. Su diámetro ronda los 1,8 kilómetros y alcanza una profundidad de alrededor de 150 metros.

Cráter Pingualuit



El cráter Pingualuit se identificó al norte de Quebec, Canadá, en 1943, durante un vuelo de la Fuerza Aérea del Ejército de los EE. UU. los expertos localizaron otras 20 estructuras de impacto al este del país. Su diámetro es de 3,4 km y acoge un lago de unos 267 m de profundidad.

Fuente: Prego (2022). https://www.xataka.com/espacio/recorrido-visual-mayores-crateres-impacto-cicatrices-que-meteoritos-dejan-tierra

Fenómenos astronómicos: ¿Qué son? y su importancia?

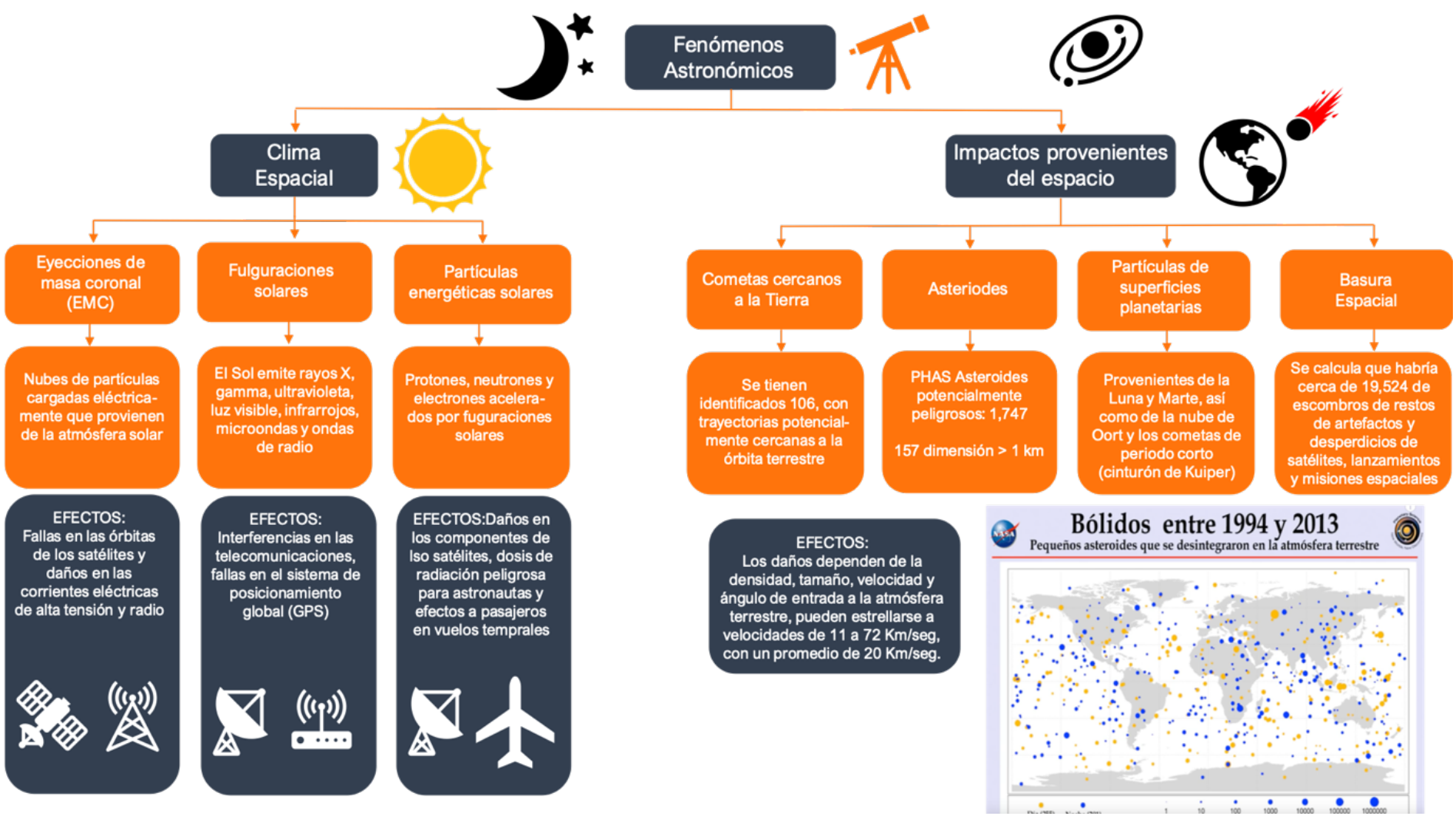
La Ley General de Protección Civil (DOF, 2012), en su artículo 20 párrafo segundo, se menciona que para "el caso de los Fenómenos Astronómicos, la Coordinación Nacional de Protección Civil, el Centro Nacional de Prevención de Desastres y la Agencia Espacial Mexicana, trabajarán conjuntamente y en el marco de sus atribuciones, a fin de crear y promover las políticas públicas en materia de prevención o atención de desastres ocasionados por objetos que provengan del espacio exterior".

Este tipo de fenómenos astronómicos perturbadores, la vulnerabilidad que como especie y el planeta tiene a la potencial probabilidad de ocurrencia de desastres de enormes magnitudes, en los cuales no se ha profundizado un análisis y estudio para su prevención o atención a emergencias desde el enfoque de la protección civil. Estos eventos cuyo potencial de generar muertes, daños al medio ambiente, servicios básicos y estratégicos, así como la posibilidad de destrucción masiva no sólo en México sino en cualquier parte del mundo (Mora, 2020).

Los fenómenos astronómicos son agentes perturbadores que se generan por la actividad del espacio exterior y que, al interactuar con la Tierra, pueden llegar a causar desastres (Mora, 2020).

Los fenómenos perturbadores astronómicos pueden clasificarse en función de:

- Clima Espacial – relacionado con la actividad solar
- Impactos provenientes de objetos del espacio



Fuente: http://consejoincide.com/wp-content/uploads/2020/08/GIRD-1.1.png

Los fenómenos astronómicos, pueden ser en forma de ráfagas solares, partículas solares energéticas y eyecciones de masa coronal que pueden llegar a causar perturbaciones geomagnéticas, como ya se ha señalado en párrafos anteriores, se producen con regularidad, algunos con efectos medibles en sistemas y tecnologías de infraestructura crítica, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), operaciones y comunicaciones por satélite, aviación y la red eléctrica.

Los eventos meteorológicos extremos –los cuales podrían degradar significativamente la infraestructura crítica– podrían deshabilitar grandes porciones de la red de energía eléctrica, emisión de voz, datos, telecomunicaciones, la banca electrónica, resultando en fallas en cascada que afectarían a los servicios claves como los financieros, bancarios, de comercio, industriales, el suministro de agua, la asistencia sanitaria y el transporte.

Su importancia entonces radica en lo potenciales efectos a nivel global, nacional o local que pueden causar: Por lo que es política del estado mexicano en materia de protección civil, prepararse para los eventos meteorológicos espaciales para minimizar sus impactos, así como sus entidades o municipios. Por lo que se deben integrar ciertas gestiones a los planes de protección civil municipal:

- Desarrollar la capacidad de monitorear y detectar un evento meteorológico espacial;
- Realizar planes y programas necesarios para alertar a los sectores público y privado para permitir acciones de mitigación para un inminente evento meteorológico espacial;
- Contar con la protección y planes de mitigación, protocolos y estándares requeridos para reducir los riesgos a la infraestructura crítica antes y durante una amenaza creíble y;
- Tener la capacidad de responder y recuperarse de los efectos del clima espacial.
- Las secretarías y agencias deben coordinar sus esfuerzos para prepararse para los efectos de los eventos meteorológicos espaciales.

Estrategia para mitigar los efectos de los riesgos derivados del clima espacial

- Entre las estrategias de mitigación a seguir para los impactos de los fenómenos astronómicos se encuentran los siguientes:
- Detección: identificación de posibles eventos y difusión rápida de la alerta.
- Defensa: protección de la infraestructura que potencialmente puede ser afectada, ya sea directamente o retrasando o reduciendo los efectos sobre redes y sistemas.
- Mitigación: minimizar el posible impacto, mediante la introducción de redundancia en los sistemas, reducción de la dependencia entre sistemas y contención del problema entre sistemas interdependientes.
- Respuesta: preparación de actividades diseñadas para potenciar la respuesta rápida y de emergencia ante los posibles incidentes, como la realización de planes y ejercicios o la disposición de equipamiento.
- Recuperación: posibilitar la restauración de las actividades comerciales y gubernamentales, de forma rápida y eficiente.

Semáforo de nivel de riesgo: Servicio de Clima Espacial México (SCiESMEX)

Color de Semáforo	Condiciones Necesarias	Nivel y Descripción
Amarillo 2	• Atmósfera solar: M1 <= Flujo de Rayos X suaves < X20 de lado noche. • Medio interplanetario: Detección de EMC, posiblemente dirigida a la Tierra, con v0 > 1000 km/s. Velocidad de viento solar in-situ > 800 km/s. • Magnetosfera terrestre: 7<=Kp<=8 y/o -150 nT>=Dst>-250 nT. • Ionosfera terrestre: Reportes de ionosfera significativamente perturbada de otros regiones del planeta. Posibles auroras boreales vistas en latitudes altas y medias (55ºN-45ºN). • Rayos cósmicos: Flujo de Rayos X suaves <= M8	**Precaución** Detección de evento intenso, sin afectaciones significativas en México.
Amarillo 3	• Atmósfera solar: M1 <= Flujo de Rayos X suaves < X20 de lado dia. • Medio interplanetario: Se confirma EMC dirigida al entorno terrestre a menos de 0.5 UA de distancia a la Tierra. • Magnetosfera terrestre: 8<=Kp<=9 y/o -250 nT>=Dst > -450 nT • Ionosfera terrestre: dTEC>350%. Posibles auroras boleares vistas en latitudes medias (45ºN-36ºN) • Flujo de Rayos X suaves > M8	**Alerta** Evento intenso con afectaciones en México.
Rojo	• Atmósfera solar y Rayos cósmicos: Flujo de Rayos X suaves >= X20 • Medio interplanetario: Detección in-situ de arribo de EMC y/u onda de choque. • Magnetosfera terrestre: Kp=9 y Dst<=-450 nT • Ionosfera terrestre: TEC >=250 TECU. Posibles auroras boreales vistas en latitudes de México (menores a 35ºN)	**Grave** Posible evento catastrófico (Carrington).
No Aplica	Cuando las condiciones a reportar: • no se recomienda un semáforo superior o igual a Amarillo 2, • se presenta una cancelación o conclusión de evento.	No Aplica

Fuente: Aguilar (2021). Sistema de Alerta Temprana de Clima Espacial.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/656389/TEMA_8_FENOMENOS_ASTRONOMICOS.pdf

Finalmente, existe una percepción generalizada a esta clase de eventos, suponiendo que este tipo de fenómenos no pasan, o que ocurren con poca frecuencia, quizá una vez en cientos de años. Sin embargo, a nivel global existen instituciones gubernamentales y académicas que están atentas ante eventuales fenómenos, y es que según especialistas y también en centros de investigación. Si bien, se recopilo información para estos fenómenos de diversas fuentes, es escasa la información relacionada con el tema.

5.3. Fenómenos hidrometeorológicos

5.3.1. Ondas cálidas y gélidas

La cantidad de energía solar recibida, en cualquier región del planeta, varía con la hora del día, con la estación del año y con la latitud. Estas diferencias de radiación originan las variaciones de temperatura. Por otro lado, la temperatura puede variar debido a la distribución de distintos tipos de superficies y en función de la altura. La distribución de continentes y océanos produce un efecto muy importante en la variación de temperatura.

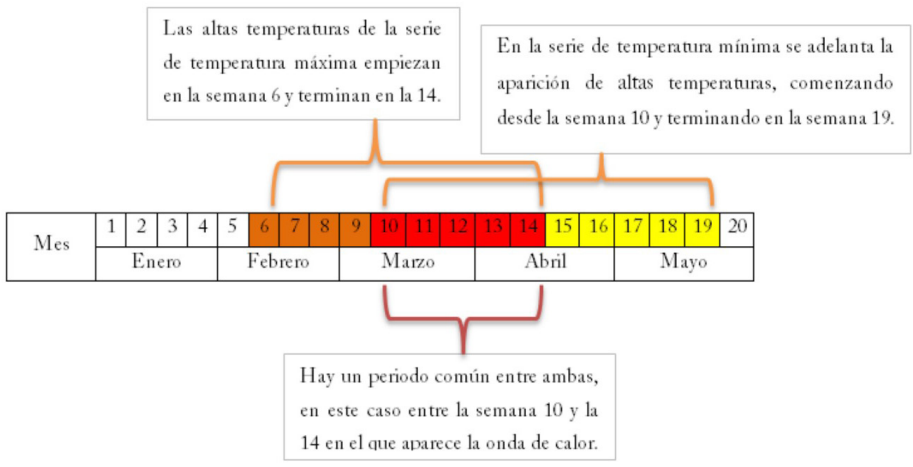
Al establecerse diferentes capacidades de absorción y emisión de radiación entre tierra y agua (capacidad calorífica), podemos decir que las variaciones de temperatura sobre las áreas de agua experimentan menores amplitudes que sobre las sólidas.

En México, en los meses de la primavera y verano se resaltan las zonas con las mayores temperaturas y el conteo de días con temperatura máxima mayor o igual a 40 °C. En la época invernal, se reportan los descensos de la temperatura que ocasionan las masas de aire frío y el conteo de días con temperatura mínima menor o igual a 0 °C. Las primeras corresponden a las ondas cálidas (OC) y las segundas a las ondas gélidas (OG).

De acuerdo a CENAPRED (2016), en México se han utilizado los umbrales de 30 y 35° C en tres días consecutivos para definir una onda de calor. Por otro lado, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) define una onda de calor cuando la temperatura máxima supera la temperatura máxima promedio en un transcurso de cinco días.

CENAPRED (2016), citando la tesis de Herrera Alanís (2012), identifica varios puntos importantes a considerar, algunos se exponen a continuación:

- Los impactos de las OC se presentan en todos los sectores productivos de la actividad humana (ganadería, agricultura, recursos forestales, salud) e, incluso, en el sector de servicios (agua potable, suministro de energía eléctrica, transporte, etc.)
- Sus impactos en la salud son conocidos desde la antigüedad (enfermedades respiratorias en invierno y gastrointestinales en verano).
- Algunos estudios recientes indican que la mortandad durante eventos de calor extremos varía dependiendo de la edad, sexo y etnia o población. Factores asociados con el incremento de riesgo son: el alcoholismo, vivir en edificios mal ventilados y el uso de tranquilizantes.
- Las OC se concentran en los meses cálidos de abril a septiembre; sin embargo, se deben analizar los meses fríos, de octubre a marzo, con el fin de observar si ocurren eventos en este periodo.
- Algunos estudios sugieren que para el estudio de las OC se deben usar más variables climáticas (Steadman, 1984, cit. CENAPRED, 2016) como la humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc., así como variables no atmosféricas (salud, nivel de vida, adaptación psicológica, etc.).
- Otra de las características de estudio de las OC, además de su intensidad, es la duración y el área.
- Las OC no guardan ninguna relación con la sequía.
- Las OC son eventos cíclicos pero aperiódicos.
- Los umbrales relativos son los más adecuados para determinar los efectos de las OC en los seres vivos.
- Por medio de umbrales relativos se observa que las OC son una anomalía de las temperaturas mínimas, ya que inician antes de lo esperado, como se muestra a continuación:



Fuente: Tomado de (Jimenez Espinoza et al., 2016).

En el municipio de Tulum predomina el clima de tipo cálido subhúmedo, por lo que es susceptible a la presencia de ondas de calor. Para identificar las ondas cálidas se analizaron datos de temperatura máximas extremas que se obtuvieron de Información Estadística Climatológica administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se utilizaron seis Estaciones Climatológicas de Referencia; dos de ellas ubicadas dentro del territorio municipal, las cuales se muestran a continuación. (tabla 92)

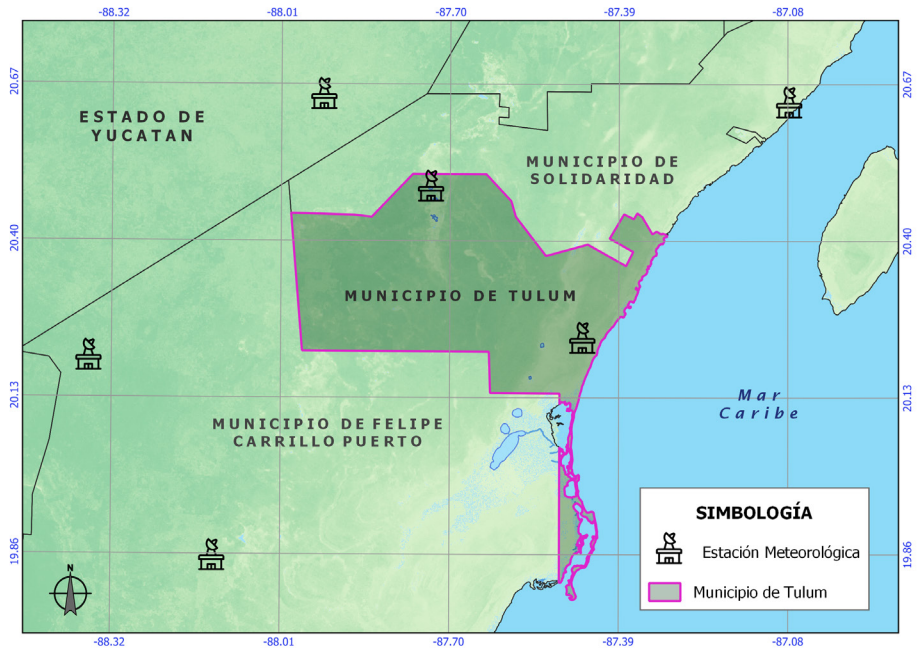
Tabla 91. Información de estaciones meteorológicas.

Clave	Periodo funcionamiento	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
23025	1964 - a la fecha	TULUM	-87.458	20.225	10
23012	1971 – a la fecha	COBA	-87.737	20.488	5
23022	1971- a la fecha	SEÑOR	-88.138	19.847	21
23024	1952- a la fecha	TIHOSUCO	-88.366	20.193	33
23163	1998- a la fecha	PLAYA DEL CARMEN	-87.077	20.634	9
31069	1978 - a la fecha	CHEMAX	-87.935	20.648	26

Fuente: Proyecto de bases de datos climatológicos, CONAGUA (2022).

Se seleccionaron las estaciones meteorológicas tomando en cuenta periodos de información que cubrieran más de 30 años de datos efectivos, a su vez que se localizaran dentro y fuera de los límites municipales de Tulum. Un total de seis estaciones fueron seleccionados y se localizan como se muestra en la figura 130.

Figura 130. Localización de estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas máximas

La temperatura máxima se refiere a la mayor temperatura registrada en un día, y que se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas. Para cada una de las estaciones seleccionadas se analizaron diferentes periodos de tiempo y la variable a utilizar fue “Temperatura máxima extrema”. Con esos datos se calcularon los promedios mensuales dando como resultado la siguiente tabla 93.

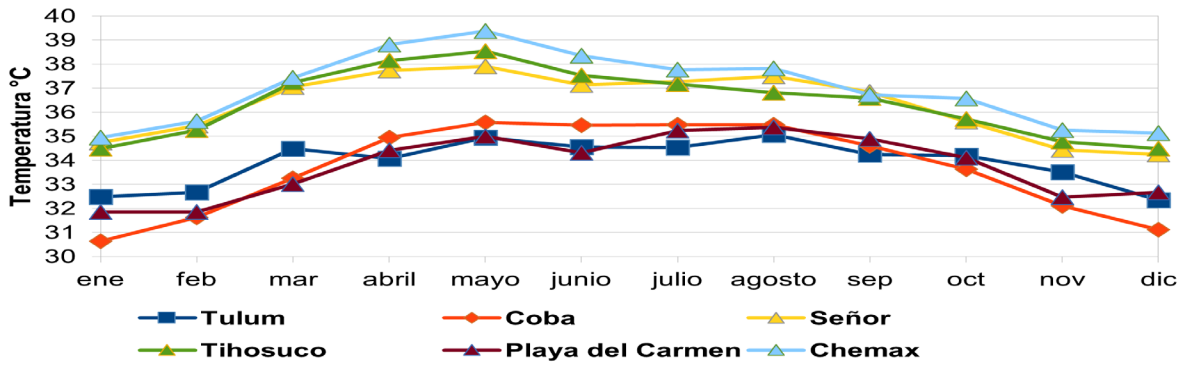
Tabla 92. Promedio de la temperatura máxima extrema mensual registrada en las estaciones meteorológicas, periodo 1964 - 2022.

Clave estación	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
23025	32.48	32.67	34.49	34.07	34.95	34.55	34.54	35.07	34.24	34.19	33.51	32.34
23012	30.63	31.62	33.25	34.94	35.57	35.45	35.47	35.48	34.61	33.63	32.11	31.12
23163	31.85	31.85	33.02	34.42	34.99	34.32	35.24	35.37	34.9	34.11	32.46	32.67
23024	34.49	35.25	37.23	38.14	38.53	37.52	37.16	36.81	36.58	35.71	34.78	34.49
23022	34.74	35.44	37.05	37.73	37.9	37.14	37.27	37.49	36.84	35.62	34.43	34.25
31069	34.94	35.63	37.42	38.81	39.38	38.35	37.77	37.81	36.73	36.57	35.26	35.14

Fuente: Elaboración propia.

La distribución mensual promedio de las temperaturas máximas extremas en cada una de las estaciones analizadas se muestra en la figura 131. Se puede observar que los valores máximos de temperatura rondan los 39°C reportados en las estaciones 23024-Tihosuco y 31069-Chemax manifestado principalmente en el mes de mayo. Por otra parte, las estaciones ubicadas en Tulum y Coba muestran valores de temperatura máxima alrededor de 35°C durante los meses de mayo a agosto, por lo que se puede considerar como un periodo de peligroso ante la ocurrencia de ondas de calor en el municipio de Tulum.

Figura 131. Gráfica de Temperaturas máximas extremas promedio mensual de las estaciones meteorológicas seleccionadas, periodo 1964 - 2022.



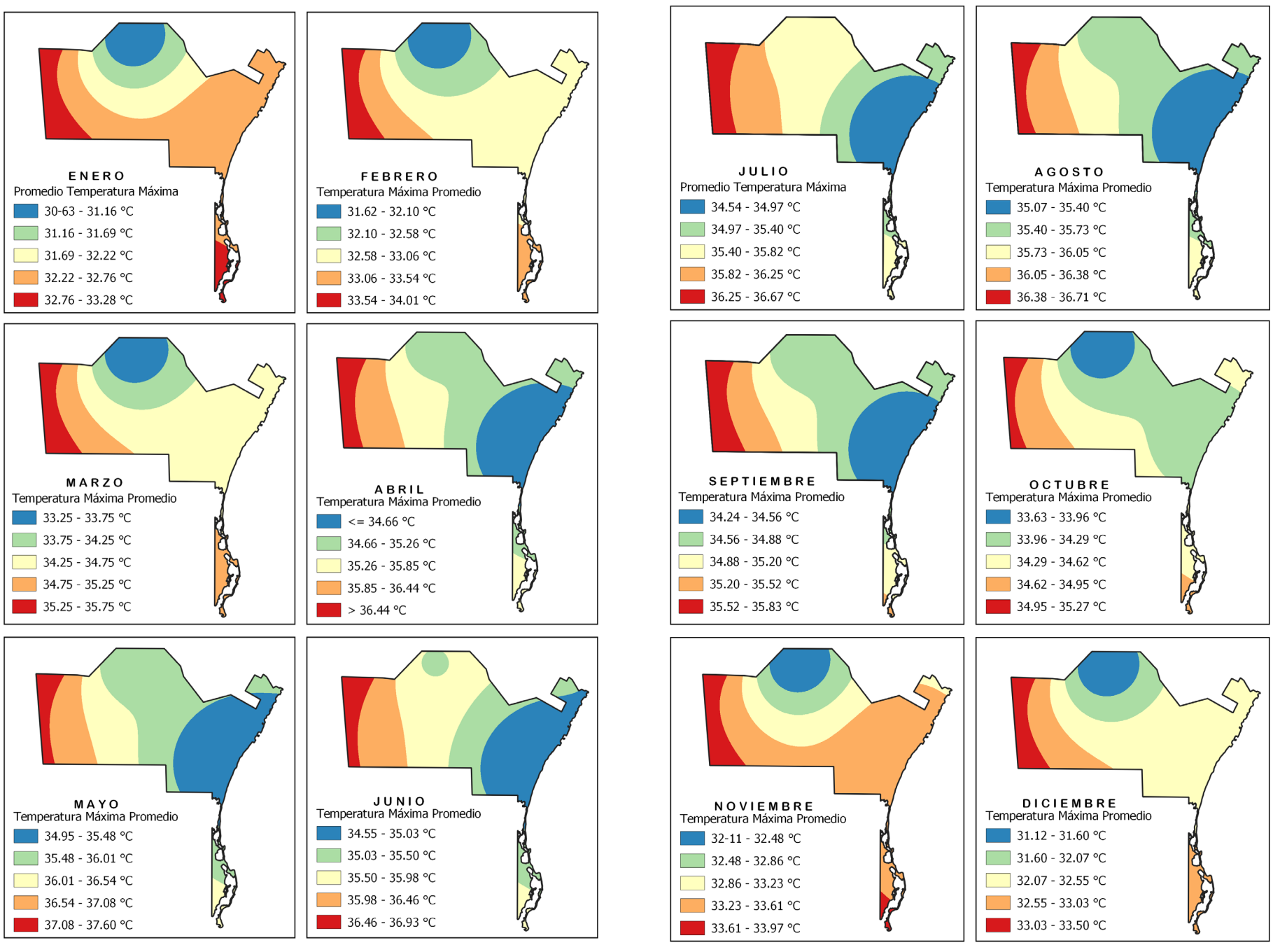
Fuente: Elaboración propia.

El procesamiento de datos se realizó mediante un método de interpolación conocido como Distancia Inversa Ponderada (IDW). Dicho método interpola los datos de una muestra dándole mayor peso a los valores que se ubican más cerca y menos a los lejanos.

Como resultado del método de interpolación; se señalan la distribución espacial de las temperaturas máximas extremas promedio mensuales dentro del municipio de Tulum para identificar zonas y momentos de afectación a la población y permitir acciones de mitigación y prevención sobre grupos vulnerables. De esa manera, se identifica que las mayores temperaturas se registran durante los meses de mayo a agosto alcanzando los 37 °C (Figura 132).

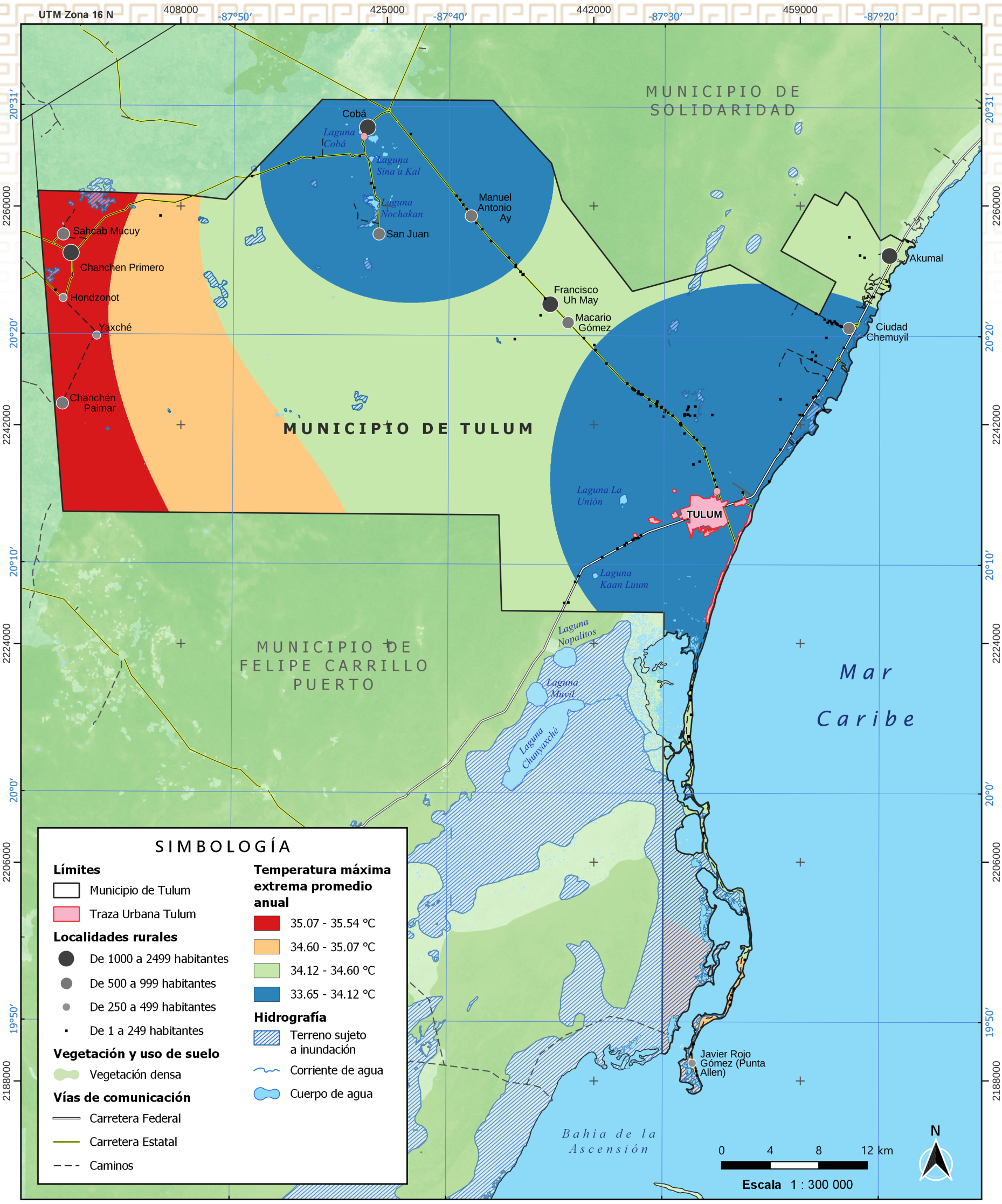
Con base a los valores de temperatura máximas mensuales obtenidos de las estaciones se procede a elaborar un mapa interpolando con los promedios anuales y conocer la intensidad de temperaturas presentes en el municipio de Tulum. En la figura 133 se observa que los valores de temperatura oscilan entre los 33. 65°C a 35.54°C; Distribuyendo las mayores temperaturas hacia el oeste del municipio perturbando principalmente localidades rurales tales como: Chanchen Palmar, Yaxché, Hondzonot, Chanchen Primero y Sahcab Mucuy. Mientras que las zonas cercanas a la ciudad de Tulum y localidad de Coba representan temperaturas por debajo de 34 °C.

Figura 132. Distribución de las temperaturas máximas extremas promedio mensuales para el municipio de Tulum.



Elaboración propia.

Figura 133. Temperatura máxima extrema promedio anual (1964 – 2022)



MAPA DE TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA PROMEDIO ANUAL (1964-2022)



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fuente:
Información estadística climatológica, Servicio Meteorológico Nacional (2022)
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 5 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales (INEGI).

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente: Elaboración propia.

Para manifestar el riesgo, una temperatura corporal por encima de los 40 °C, es muy probable que sea fatal debido al daño causado a las enzimas respiratorias y el sistema termorregulador. La mayoría de las muertes que ocurren por las olas de calor provienen del estrés térmico acumulado (ya sea durante días o semanas), y eso tiene más que ver más con los largos periodos de exposición a un calor moderado (30-35 °C) de las máximas o picos de una temporada. La exposición prolongada a ambientes mayores a los 40 °C causa deshidratación y otros problemas en las personas menores de 5 años y mayores de 65, por lo que se consideran los grupos más vulnerables.

De acuerdo a los análisis de los datos obtenidos, para el municipio de Tulum estas temperaturas promedio anual no se han alcanzado, sin embargo, se pueden identificar zonas con temperaturas máximas mayores a 35 °C. Lo que constituyen las áreas más vulnerables y que afectan a la población.

Es importante mencionar que, el registro de la Dirección de Servicios de Salud informa sobre los casos presentados por temperaturas máximas extremas en el municipio de Tulum dentro del periodo comprendido del 2014 al 2022; se presentaron 2 casos por trabajadores de la construcción y por grupo de edad que oscilan entre los 20 a 39 años.

Tabla 93. Número de afectaciones a la salud provocadas por temperaturas máximas extremas en el municipio de Tulum.

Año	Casos	Defunciones
2014	1	0
2015	0	0
2016	1	1
2017	0	0
2018	0	0
2019	0	0
2020	0	0
2021	0	0
2022	0	0

Fuente: Secretaría de Salud del Estado de Quintana Roo

Temperaturas mínimas

Una helada es la disminución de la temperatura del aire cercano a la superficie del terreno llega a valores de 0 °C o menos, durante un tiempo mayor a 4 horas. Puede provocar pérdidas a la agricultura y afectar a la población; afectando sobre todo, las personas que habitan en casas frágiles o que son indigentes (CENAPRED,2014).

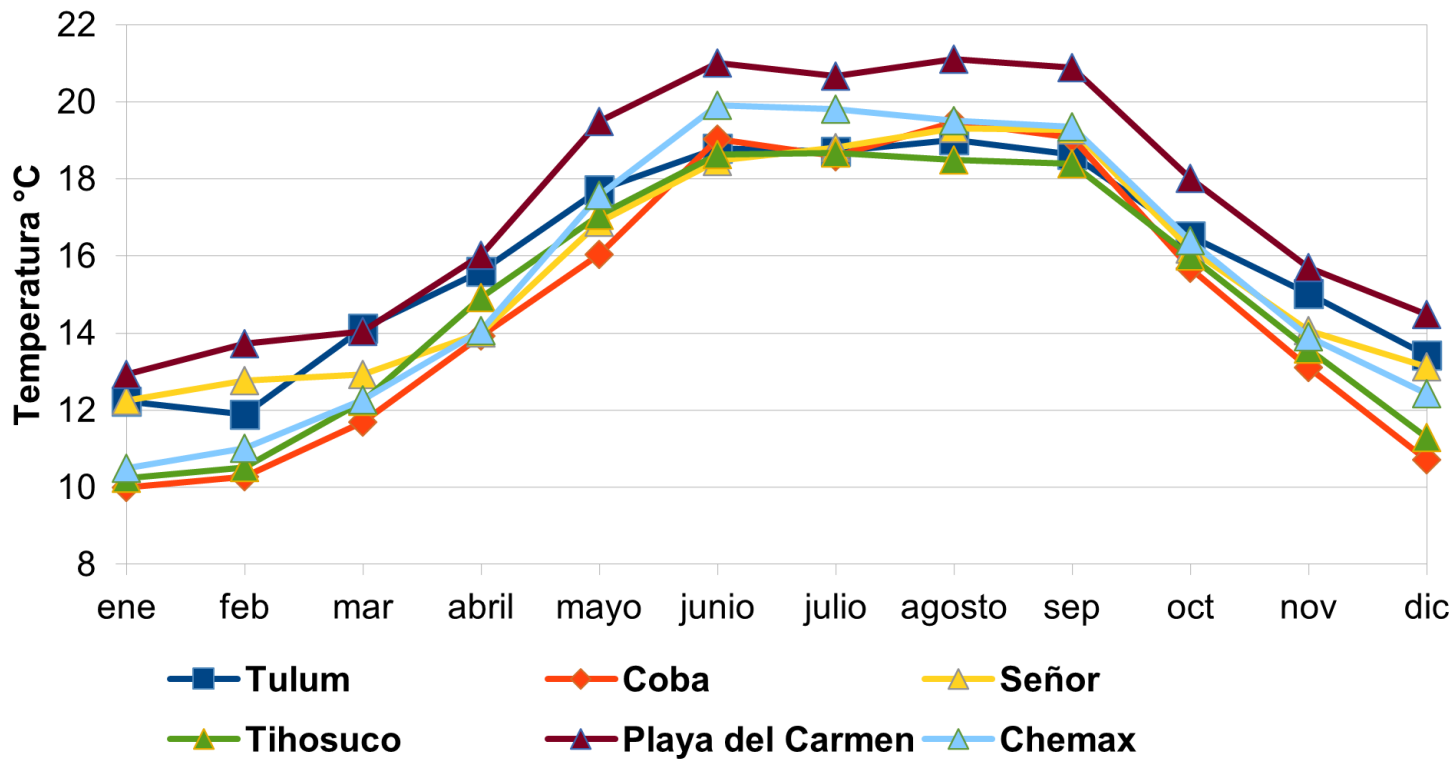
Se utilizó la base de datos de Información Estadística Climatológica para el análisis de las temperaturas mínimas extremas de las seis estaciones seleccionadas y se calcularon los promedios mensuales.

Tabla 94. Promedio de la temperatura mínima extrema registrada en las estaciones meteorológicas (1964-2022).

Clave estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
23025	12.23	11.88	14.13	15.6	17.72	18.78	18.71	19.01	18.63	16.52	15.01	13.42
23012	10	10.26	11.68	13.92	16.04	19.03	18.58	19.47	19.06	15.67	13.11	10.71
23022	12.25	12.77	12.93	14.01	16.88	18.46	18.81	19.31	19.26	16.17	14.07	13.12
23024	10.23	10.51	12.22	14.91	17.05	18.63	18.67	18.49	18.4	16	13.58	11.29
23163	12.93	13.72	14.05	16.01	19.48	21	20.66	21.11	20.89	18.02	15.7	14.48
31069	10.48	11	12.27	14.07	17.58	19.91	19.81	19.51	19.34	16.14	13.91	12.42

La distribución mensual promedio de las temperaturas mínimas extremas en cada una de las estaciones utilizadas se muestra en la figura 134. Se puede observar que los valores mínimos de temperatura rondan los 11°C reportados en las estaciones 23024-Tihosuco y 23012-Coba manifestados principalmente en los meses de diciembre a febrero, mientras que las temperaturas alrededor de los 20 °C se aprecian en las estaciones de 23163-Playa del Carmen y 31069-Chemax durante los meses de junio a septiembre.

Figura 134. Gráfica de Temperaturas mínima promedio mensual para el municipio de Tulum (1964-2022).



Fuente: Elaboración propia.

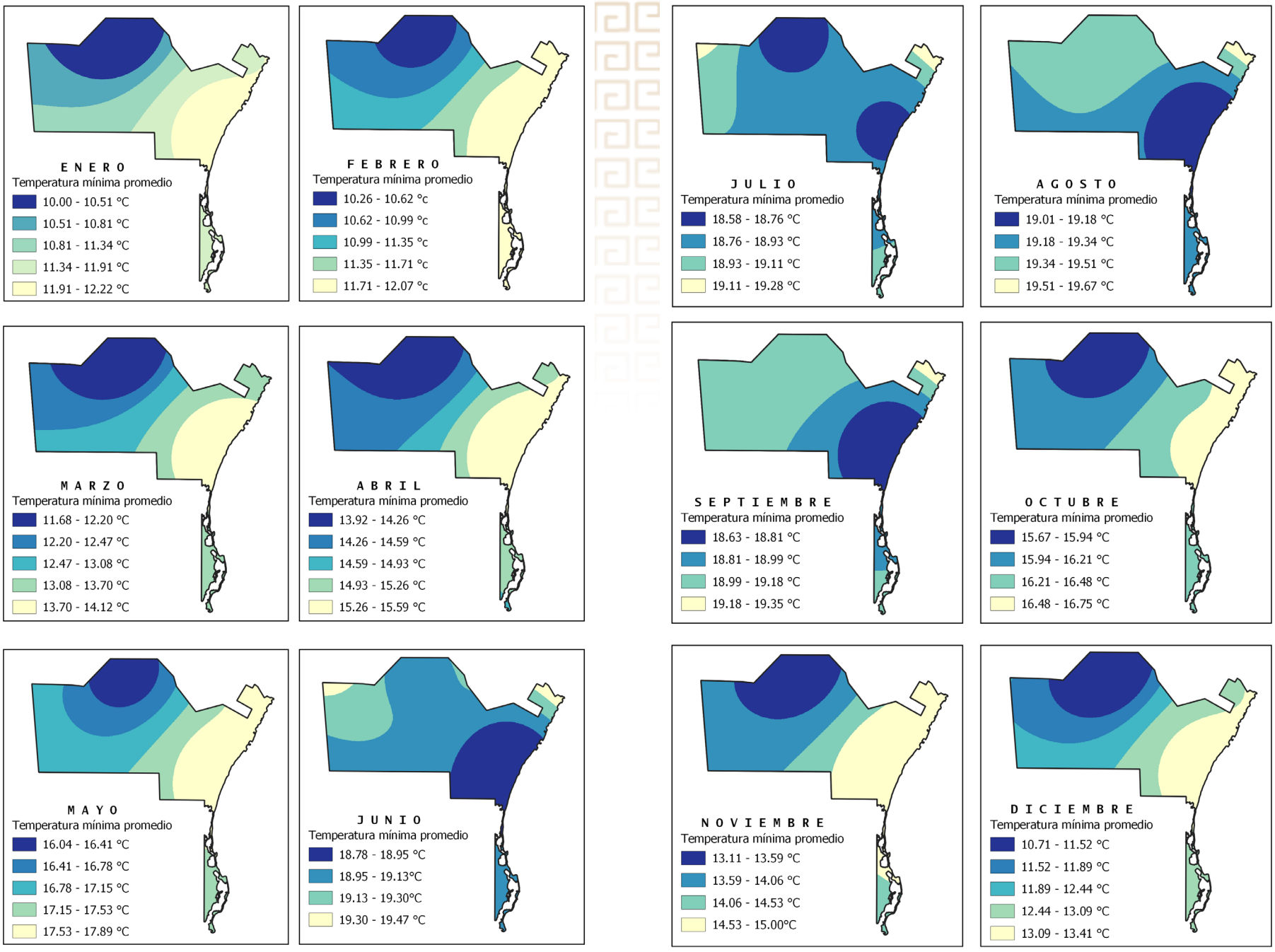
De acuerdo a lo derivado de la interpolación; la distribución espacial de los meses más fríos o con temperaturas más bajas para el municipio de Tulum fueron, de acuerdo al promedio mensual por año contabilizado, los meses de enero y febrero teniendo temperaturas de 10 °C; que luego tienen un ascenso entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre para volver a descender en el mes de diciembre. (Figura 133)

Como resultado de la interpolación de los promedios mensuales anuales, se elabora la figura 135 obteniendo temperaturas mínimas que oscilan entre los 14.79 °C a 16.10 °C. En el municipio de Tulum, no se registran temperaturas constantes cercanas a los 0° C, por lo que este peligro es mínimo para su población. Sin embargo, la mayoría de los habitantes que viven en climas templados y tropicales no están acostumbrados a experimentar temperaturas extremas heladas.

En el municipio de Tulum, no se registran temperaturas constantes cercanas a los 0° C, por lo que este peligro es mínimo para su población. Con relación a la anterior, del año 2014 al año 2022, la Dirección de Servicios de Salud registro 0 casos por temperaturas mínimas extremas en el municipio de Tulum.

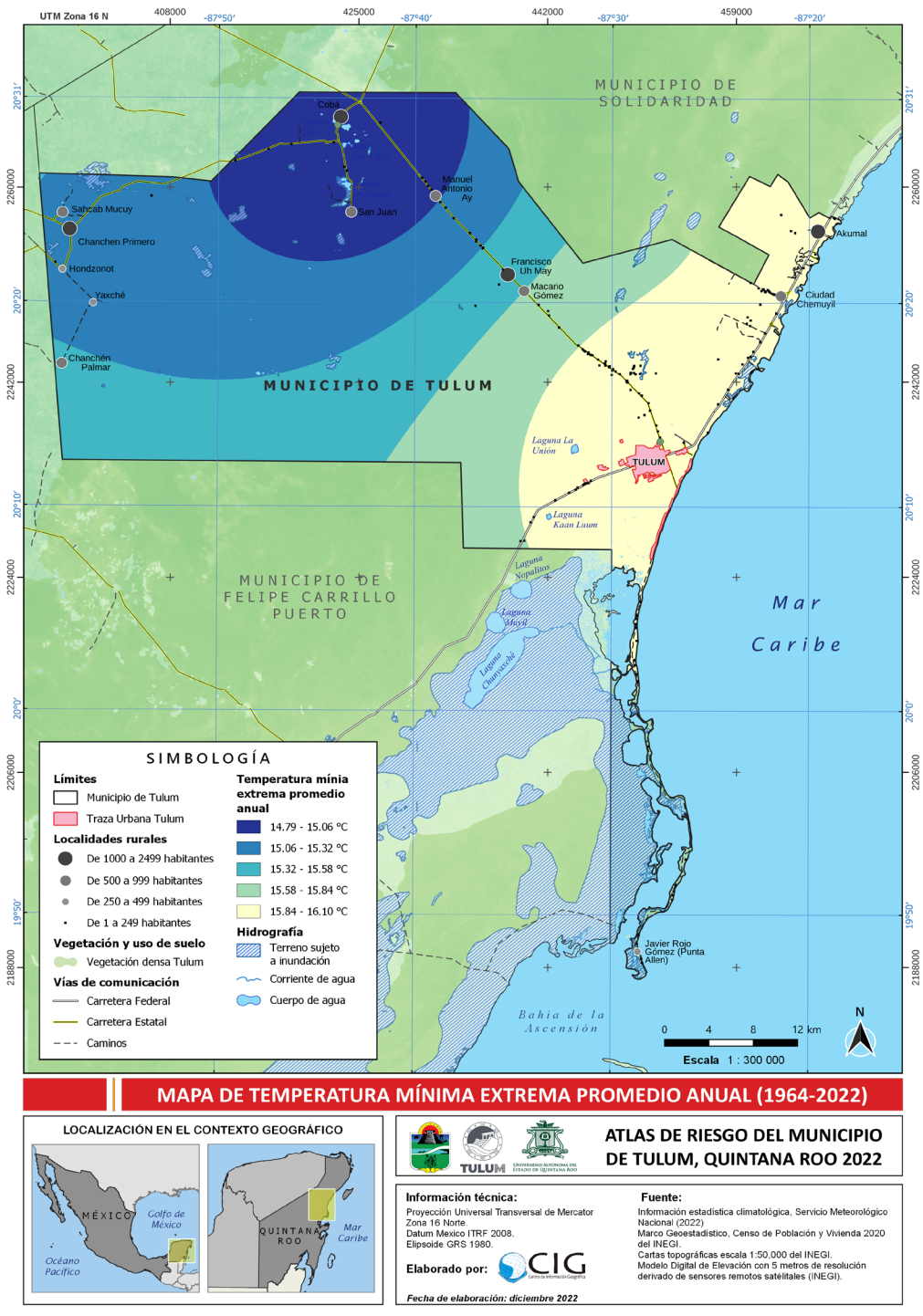
Se pueden identificar las regiones y localidades que pueden ser más propensas a alcanzar temperaturas inferiores a los 15 °C, como son las localidades Coba, San Juan y Manuel Antoni Ay. Por otra parte, las temperaturas un poco más elevadas se localizan alrededor de la capital del municipio (Chemuyil y Akumal), posiblemente porque existe más intervención humana que ha urbanizado parte de ese territorio.

Figura 135. Distribución de las temperaturas mínimas extremas promedio mensuales para el municipio de Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 136. Temperatura mínima extrema promedio anual (1964 – 2022).



Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Sequías

La sequía es uno de los fenómenos naturales más complicados y complejos, que a más personas afecta a nivel mundial, tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y el espacio, sus efectos son acumulativos y pueden permanecer aún después de la culminación del evento (Wilhite, 2000, cit. Núñez, Reyes, Gadsden, Muñoz y Velasco, 2007). Interpretar la magnitud del déficit de precipitación puede ser un reto, ya que la climatología de la precipitación (por ejemplo, montos anuales y su distribución estacional) se modifica ampliamente entre regiones geográficas y escalas temporales. Por lo tanto, el desafío de la definición de sequía no reside en la medición sin procesar de los datos hidrometeorológicos, sino en la evaluación objetiva de las observaciones.

La Organización Mundial Meteorológica (OMM) señala que la sequía ha ocasionado pérdidas significativas en países menos desarrollados. Las precipitaciones han estado por debajo de la media durante cinco estaciones de las lluvias consecutivas, algo que jamás había ocurrido en los últimos 40 años. En enero de 2023, se estimaba que más de 20 millones de personas se enfrentaban a una grave inseguridad alimentaria en la región, a causa de los efectos de la sequía y otras perturbaciones (OMM, 2023).

Nuñez, et. al. (2007) señala que una amplia revisión de definiciones sobre sequía fue publicada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1975, cit. Nuñez, et al., 2007). Que de acuerdo con diferentes autores citados por Nuñez, et al. (2007) la sequía se clasifica en meteorológica, hidrológica y agrícola.

La meteorológica procede de una condición atmosférica caracterizada por un déficit en la cantidad de precipitación que normalmente se presenta en una región y en un periodo de tiempo específico (Guttman, 1999; Komuscu, 1999; Wilhite, 2000, cit. Núñez, et al., 2007). A su vez, si este déficit de precipitación se asocia con altas temperaturas, baja humedad relativa y alta radiación solar, se aumentan los niveles de evaporación y transpiración y, por tanto, aumenta el déficit de humedad en el suelo, lo que impide o limita el crecimiento de cultivos; esta etapa se designa sequía agrícola y puede durar uno o varios meses (Quiring y Papakryiakou, 2003; Wu et al., 2004; Narasimhan y Srinivasan, 2005, cit. Nuñez, et al., 2007). Y finalmente una sequía hidrológica ocurre cuando la prolongación de estas condiciones atmosféricas afecta la recarga de cuerpos de agua superficiales y subterráneos debido a la disminución del volumen de escurrimiento e infiltración (Núñez, et al., 2007).

Este mismo autor señala que la gravedad de una sequía dependerá del grado de reducción en la precipitación, en su duración y su extensión geográfica, así como de la demanda de agua para la permanencia de los sistemas naturales y el desarrollo de las actividades humanas. Un evento de sequía se detecta mediante la disminución de precipitaciones históricamente normales, las cuales puede influir en el estado de los cultivos agrícolas.

Las predicciones para el futuro de las condiciones y frecuencias de sequía bajo un clima cambiante son necesarias para minimizar o prevenir daños potenciales a ecosistemas y recursos hídricos (Mirgol, et al., 2021).

Sequía México

Uno de los fenómenos climáticos que más afecta a las actividades económicas del país es la sequía, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encarga de detectar el estado actual y la evolución de este fenómeno. Para ello se apoya en el Monitor de Sequía en México (MSM) que a su vez forma parte del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM).

El SMN es la institución oficial del gobierno mexicano encargada de proporcionar información meteorológica (estado del tiempo) y climatológica. Para ello utiliza las redes de observación tales como estaciones automáticas, observatorios sinópticos, radares, estaciones de radio sondeo y estaciones receptoras de imágenes de satélite. Aun cuando el MSM inició en México en 2002 dentro de las actividades del NADM, fue hasta el año de 2014 que adquirió su carácter nacional, lo que le permitió emitir mapas de sequía en escala de tiempo diferente a la mensual, siempre basada en la metodología utilizada por el USDM y el NADM. A partir de febrero de 2014 la emisión del MSM es quincenal.

Sequía intraestival o canícula

Documentado por Orellana et al., 2009 (cit. Estrada & Cobos, 2014), la precipitación pluvial en las zonas tropicales de México por lo general se presenta con régimen de verano. Sin embargo, en la Península de Yucatán puede haber también áreas con régimen de lluvia intermedio o con lluvias uniformemente repartidas con tendencia a presentar lluvias en verano. En todo caso, en la Península de Yucatán, al igual que en una considerable parte de México, Centroamérica y el Caribe, se presenta el fenómeno de la sequía de medio verano, también denominado sequía intraestival, o simplemente, canícula.

La canícula se debe a perturbaciones en la circulación de los alisios. En verano se presenta un sobrecalentamiento del mar en la porción tropical del Pacífico oriental, por debajo de la zona intertropical de convergencia, lo cual debilita el gradiente barométrico y, por ende, disminuye la intensidad de los alisios. De forma concomitante, si se expande la acción del anticiclón del Atlántico, se refuerza este efecto, el que tiene una duración variable año con año. Este sistema es muy sensible a cambios de temperatura en el mar, incluso en décimas de grado. Se esperaría, por tanto, que el efecto del calentamiento global también afecte a este sensible sistema. Lo anterior trae como consecuencia una disminución en la frecuencia y la cantidad de lluvia (Orellana et al., 2009).

Metodología del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para sequía

De los índices que actualmente se utilizan para vigilar la sequía tenemos al Índice Estandarizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés) también conocido como el Índice Normalizado de Precipitación, uno de los más utilizados en más de 70 países. Este índice fue desarrollado por primera vez por McKee et al. (1993, 1995).

En México el SPI se utiliza para cuantificar las condiciones de déficit o exceso de precipitación para 30, 90, 180 y 365 días. El SPI y los otros índices se despliegan en capas o layers a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y mediante un consenso se determinan las regiones afectadas por sequía. Se emplea una escala de intensidades que va desde anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) hasta sequía excepcional (D4).

Como resultado del proceso se trazan polígonos para cada intensidad de sequía, generando archivos tipo shapefile. Cuando los polígonos corresponden al análisis de mediados de mes (emitido los días 15 de cada mes) se utilizan para cuantificar la sequía sobre el territorio nacional y cuando corresponden a la evaluación final de cualquier mes complementa además al mapa regional o continental del NADM.

La sencillez del SPI radica en que utiliza únicamente la precipitación para el cálculo de la sequía y es efectivo para analizar los períodos y ciclos húmedos y secos. El SPI puede calcularse para distintas escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 24 y 48 meses) lo cual permite evaluar la severidad de la sequía en el corto y largo plazo, los inconvenientes es que únicamente puede cuantificar el déficit de precipitación, y las precipitaciones normales cambian en todos los lugares dependiendo de si el período se considera “normal”. Sin duda, tales cambios tendrían un impacto al estandarizar los datos de precipitación, pero también pueden afectar a los resultados del SPI (Hayes, 2000). Idealmente se requiere de un mínimo de entre 20 y 30 años de valores mensuales de precipitación para su cálculo, pero lo óptimo y preferible es utilizar 50 y 60 años o más de acuerdo con la Guía del usuario sobre este índice de la Organización Meteorológica Mundial (2012).

5.3.2.1. Metodología

Para el cálculo de sequía meteorológica del municipio de Tulum se emplearon dos métodos de cálculo para obtener el SPI. El primero, mediante Google Earth Engine (GEE) basado en datos de teledetección a gran escala, donde se analizaron 42 años de datos de precipitación (1981-2023) para escalas de 3, 6 y 12 meses. Y el segundo, a través del software RStudio, un entorno de desarrollo para el lenguaje de programación “R”, con un enfoque más hacia el cómputo y análisis estadístico.

El segundo método se basa en registros históricos de precipitación de 6 estaciones meteorológicas distribuidas cerca del territorio del municipio

de Tulum, abarcando una temporalidad de 70 años (1952-2022). Cabe resaltar que entre los inconvenientes encontrados en el municipio fue la falta de estaciones meteorológicas, ya que de las seis utilizadas para este cálculo solo 2 se localizan en el territorio (2302 y 23012), otras 2 corresponden al municipio de Felipe Carrillo Puerto (23024), otra al municipio de Solidaridad (2316) y otra al Estado de Yucatán (31069) (tabla 96).

Tabla 95. Información de estaciones meteorológicas.

Clave	Periodo funcionamiento	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
23025	1964 - a la fecha	TULUM	-87.458	20.225	10
23012	1971 – a la fecha	COBA	-87.737	20.488	5
23022	1971- a la fecha	SEÑOR	-88.138	19.847	21
23024	1952- a la fecha	TIHOSUCO	-88.366	20.193	33
23163	1998- a la fecha	PLAYA DEL CARMEN	-87.077	20.634	9
31069	1978 - a la fecha	CHEMAX	-87.935	20.648	26

Fuente: Proyecto de bases de datos climatológicos, CONAGUA (2022).

5.3.2.2. Memoria de Cálculo

Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

Este índice fue creado por McKee en 1993 y destaca por su sencillez y facilidad de cálculo. Su significado desde el punto de vista estadístico, además de la relación de los déficits de precipitación con los diferentes impactos en las aguas subterráneas, el almacenamiento de agua en reservorios, en la humedad del suelo, los bancos de nieve y los caudales fluviales, lo hacen altamente aceptado en los estudios de la sequía.

Para el municipio de Tulum, se cuantificaron las condiciones de déficit o exceso de precipitación para 3 meses, 6 meses y 12 meses, es decir, trimestral, semestral y anual. Los datos obtenidos para el cálculo de SPI a través de GEE cubrieron un periodo de 42 años (1981 a abril 2023). Por otra parte, los datos obtenidos del SMN y CONAGUA (2022) cubren un periodo de 70 años (1952 – 2022).

Escala de valores SPI

La sencillez del SPI radica en que utiliza únicamente la precipitación para su cálculo y es efectivo para analizar ciclos húmedos y secos, que para el municipio de Tulum se examinan de la siguiente manera: julio a diciembre para periodos húmedos y enero a junio para periodos secos. Los registros de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidades y a continuación se transforman en una distribución normal. Los valores positivos/negativos del SPI indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana. Idealmente se requiere de entre 20 y 30 años de valores mensuales de precipitación para su cálculo, pero lo óptimo y preferible es utilizar 50 y 60 años o más de acuerdo con la Guía del usuario sobre este índice de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012).

Para el municipio de Tulum el periodo de estudio abarco 70 años para los datos derivados de las estaciones meteorológicas (1952 a 2022) y 42 años para los datos que se obtuvieron de las imágenes de satélite a través de la plataforma de GEE. El SPI se calculó para distintas escalas temporales (3, 6, y 12, meses) permitiendo evaluar la severidad de la sequía en el corto, mediano y largo plazo. No obstante, uno de los inconvenientes es que únicamente puede cuantificar el déficit de precipitación.

La escala de valores para el análisis del SPI utilizada se basa en la Guía del usuario del Índice Normalizado de precipitación (OMM, 2012) y Merg et al. (2011). Los valores positivos/negativos del SPI indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana. Es decir, los valores negativos indican déficit y los positivos, exceso (tabla 97).

Tabla 96. Clasificación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

SPI	Periodo	Frecuencia teórica de ocurrencia
2.0 y más	Extremadamente húmedo (exceso extremo)	1 en 50 años
1.5 a 1.99	Muy húmedo (exceso severo)	1 en 20 años
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo (exceso moderado)	1 en 10 años
0.50 a 0.99	Ligeramente húmedo	1 en 3 años
0.49 a -0.49	Normal	
-0.5 a -0.99	Ligeramente Seco	
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco (sequía moderada)	1 en 10 años
-1.50 a -1.99	Muy seco (sequía severa)	1 en 20 años
-2.00 o menor	Extremadamente seco (sequía extrema)	1 en 50 años

Fuente: Tomado de Hernández, et al. (2022) a partir de OMM (2012) y Merg et al. (2011).

Google Earth Engine (GEE)

Esta herramienta combina más de 40 años de imágenes de satélite del planeta, tanto históricas como actuales, junto con las herramientas computacionales que permiten analizar y extraer información de este enorme almacén de datos. GEE se define como una plataforma de geomática que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite a nivel global desde una nube de datos sin necesidad de realizar una descarga previa de dichas imágenes, optimizando tiempos de procesamiento y sin necesitar almacenamiento en equipos de cómputo (Google Earth Engine, 2022).

Primero, para calcular el SPI a través de Google Earth Engine, los datos se obtuvieron del Centro de Amenazas Climáticas de UC Santa Barbara en los EE. UU. (https://www.chc.ucsb.edu) que consisten en más de 42 años de precipitación global.

Con la primera técnica empleada con GEE se obtuvieron seis gráficas (figuras 138, 139, 141, 142, 144 y 145) y tres mapas (figuras 137, 140 y 143) a través del script para el cálculo del SPI. Los primeros con una escala de tiempo de 3 meses, los segundos para 6 y los últimos para 12 meses.

R studio para el cálculo del SPI

Con el segundo método, donde el cálculo del SPI se realiza a través del código de programación en R, los datos obtenidos se graficaron para 3 meses, 6 meses y 12 meses. El periodo de estudio abarca 70 años de 1952 a 2022, lográndose identificar periodos secos y años húmedos (gráficas 8, 9 y 10).

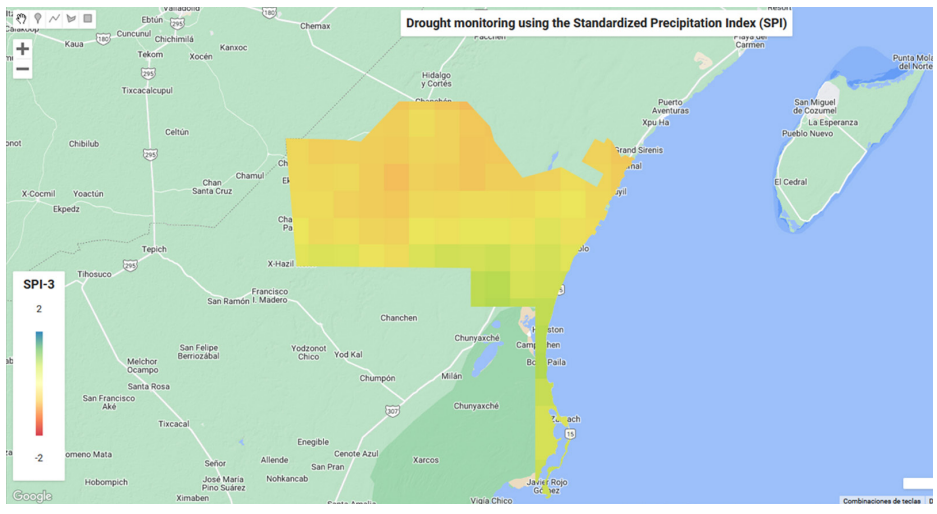
A partir del cálculo del SPI para 3, 6 y 12 meses con “R”, se construyó una base de datos para cada uno de los años de análisis por estación. Se calcularon los promedios del índice por estación y se dividieron en dos grandes periodos de análisis: temporada seca y temporada húmeda. valor positivo indica una precipitación por encima del promedio y uno negativo indica una precipitación por debajo del promedio para el período determinado.

Posteriormente, a estos promedios por estación de los 70 años analizados se les aplico el algoritmo de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted) dentro de un Sistema de información Geográfica, utilizando el software QGIS 3.x. Se eligió la interpolación IDW por que genera una interpolación a partir de una capa vectorial de puntos (estaciones meteorológicas). Los puntos se ponderan durante la interpolación de modo que la influencia de un punto en relación con otro disminuye con la distancia desde el punto desconocido que desea crear, al darle valores conocidos, la interpolación estima valores desconocidos.

5.3.2.3. Resultados

En la figura 4 para una escala temporal de 3 meses a partir del uso del script SPI dentro del entorno de GEE se puede observar que al centro del municipio es donde los periodos de sequía se han concentrado más alcanzando valores negativos. Por el contrario, hacia el sur, limitando con la Reserva de la Biosfera, se observan valores positivos correspondiente a periodos más húmedos. Esto igual se refleja en la parte sur del municipio, lo que puede deberse a las corrientes subterráneas situadas en esa región.

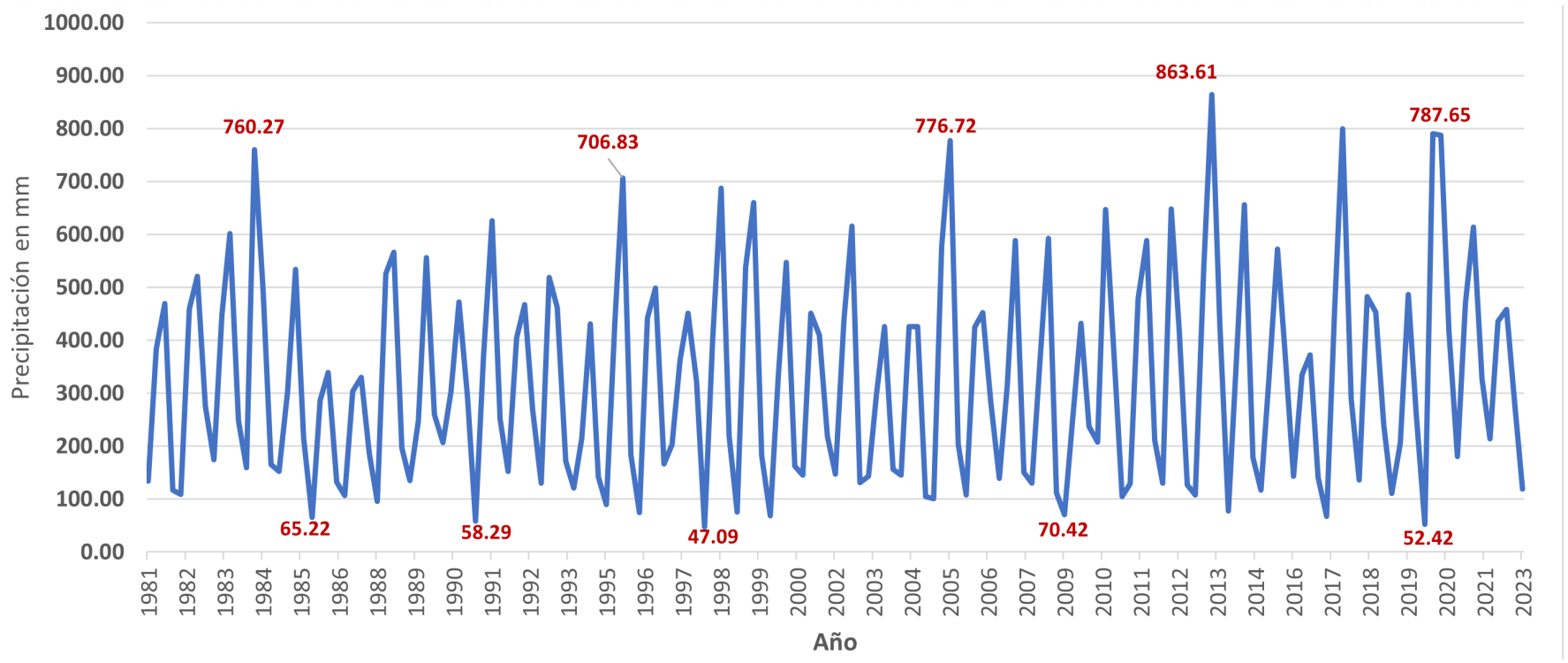
Figura 137. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) 3 meses



Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, si observamos las gráficas 2 y 3, podemos distinguir en la primera gráfica que la acumulación de precipitación durante estos 42 años de análisis para 1988, 1991, 1998, 2009 han sido los periodos con sequía meteorológica más significativa, ya que se recibió menos de 80mm en tres meses. Por el contrario, en 1984, 1995, 2005, 2013 la acumulación de lluvia fue por arriba de los 700mm para tres meses. Es de especial interés el año 2020, ya que si bien inicia con un periodo con mínima precipitación (52.42mm) en su periodo húmedo (julio a diciembre) la precipitación alcanzó valores de 863.61mm en tres meses. Lo anterior puede deberse a la temporada de huracanes en el Atlántico de ese año ya que fue una temporada muy activa donde la formación de ciclones tropicales se dio a un ritmo récord, siendo la temporada más activa de la historia desde que comenzaron los registros.

Figura 138. Gráfica de Precipitación acumulada 3 meses (1981 a 2023)

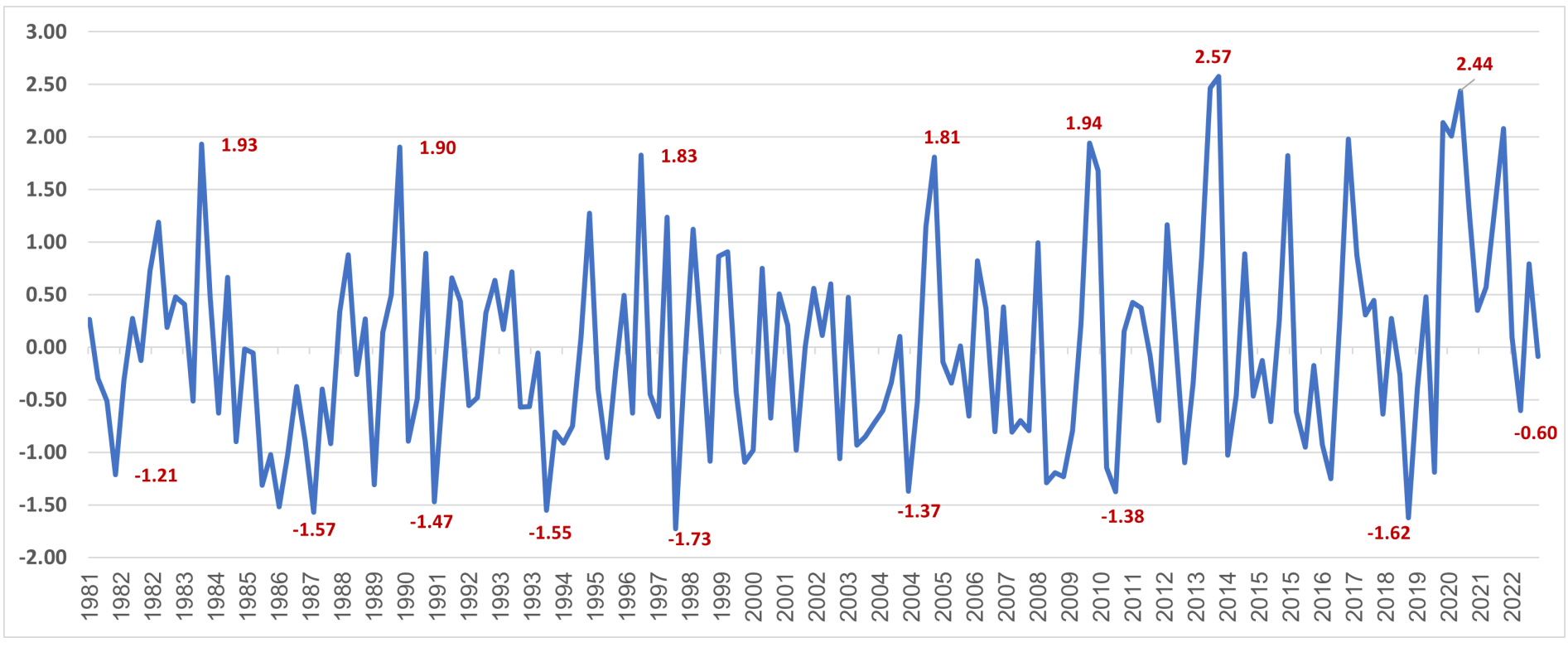


Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del SPI para un periodo de 3 meses se advierte que en 1987 el valor registrado fue de -1.57, en 1994 de -1.55, en 1998 de -1.73 y en 2019 de -1.62, lo que indica sequía severa de acuerdo con la tabla de valores para el índice (tabla 2). Es decir, para los tres primeros periodos este fenómeno se repite cada 4 años aproximadamente, entre 1998 a 2019 el periodo si fue de 20 años lo que se ajusta a lo mostrado en la tabla de valores para el SPI. Si la tendencia sigue este patrón entonces para 2029 se tendría otro periodo de sequía severa. Los otros valores señalados menores a -1.00 indican una sequía moderada.

Por otro lado, se observan también valores positivos, los cuales indican periodos húmedos. Valores arriba de 2 señalan periodos extremadamente húmedos este es el caso para los años de 2013 y 2020. También se reconocen años con humedad severa, es decir, el índice alcanzo valores entre 1.5 a 1.99, esto se observa para los años 1984, 1990, 1997,2005 y 2010. Si bien se espera que lo vivido en 2020 se repita en 50 años se debe estar prevenido observando cambios anómalos en el comportamiento de la precipitación ya sea déficit o exceso de lluvia.

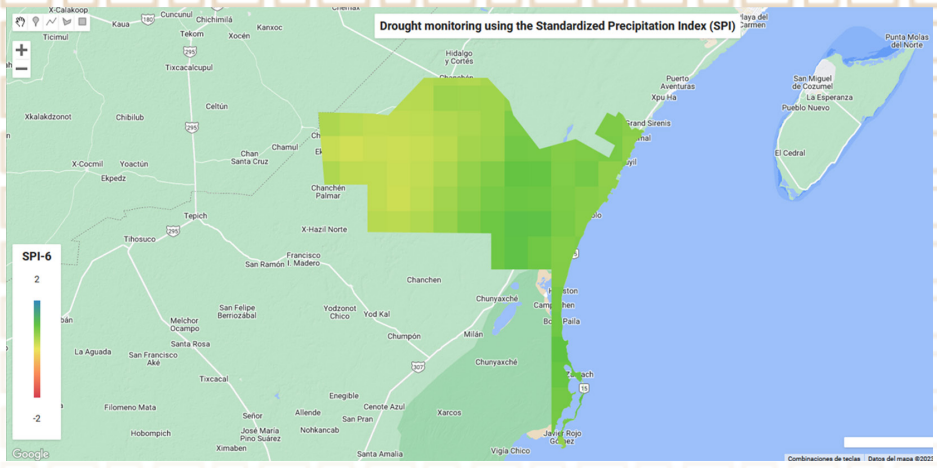
Figura 139. Gráfica del SPI 3 meses (1981 a 2023)



Fuente: Elaboración propia.

Para la escala temporal de 6 meses el resultado obtenido nos muestra que la mayor parte del territorio del municipio de Tulum no presenta sequía severa (figura 5), en algunas celdas al oeste se distinguen valores de sequía moderada. Lo anterior indica que el déficit de precipitación se presentó hacia el centro-oeste del municipio (figura 5)

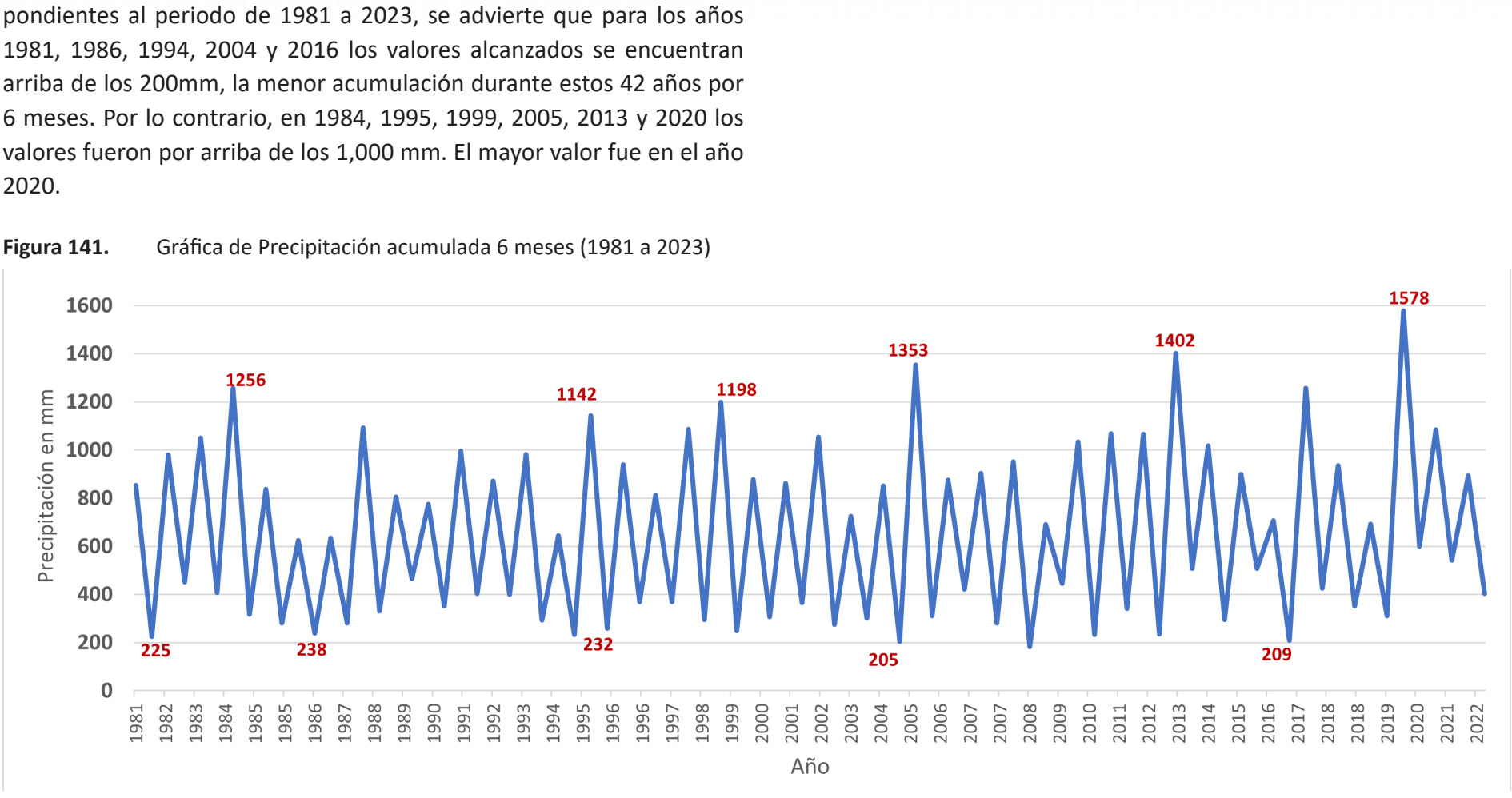
Figura 140. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) 6 meses



Fuente: Elaboración propia.

Observando las gráficas 4 y 5 de precipitación y SPI a 6 meses, correspondientes al periodo de 1981 a 2023, se advierte que para los años 1981, 1986, 1994, 2004 y 2016 los valores alcanzados se encuentran arriba de los 200mm, la menor acumulación durante estos 42 años por 6 meses. Por lo contrario, en 1984, 1995, 1999, 2005, 2013 y 2020 los valores fueron por arriba de los 1,000 mm. El mayor valor fue en el año 2020.

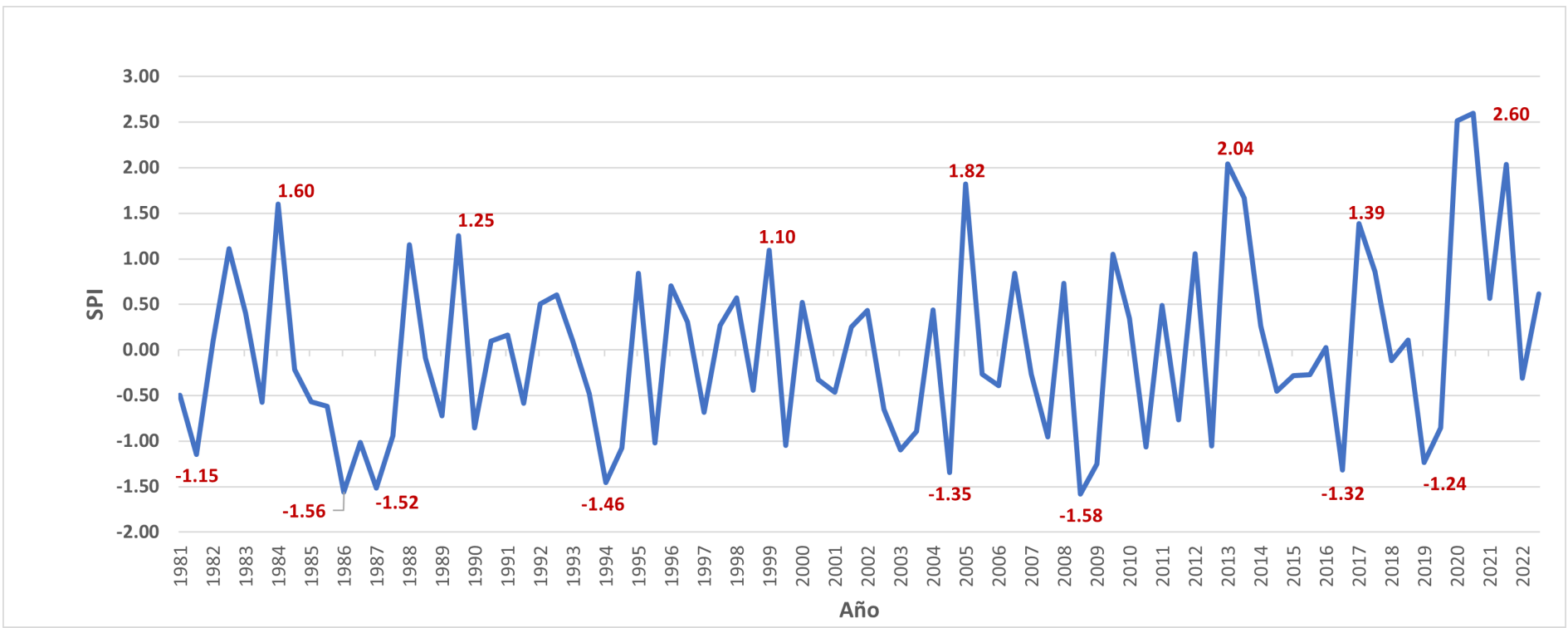
Figura 141. Gráfica de Precipitación acumulada 6 meses (1981 a 2023)



Fuente: Elaboración propia

El cálculo de SPI para escala de 6 meses nos muestra que los valores -1.15 (1981); -1.46 (1994); -1.35 (2004); -1.32 (2016) y -1.24 (2019) indican sequía moderada, la cual de acuerdo con la tabla de clasificación esta se presenta cada 10 años, sin embargo, esto concuerda de 1981 a 2016, el periodo de retorno se acorta entre 2016 y 2019 con tan solo 3 años (gráfica 5). Por otra parte, 1989, 1999 y 2017 fueron años moderadamente húmedos, por el contrario, los años 1984 y 2005 fueron muy húmedos, pero 2013 y 2020 se consideran años extremadamente húmedos ya que los valores para el SPI superan el 2 (figura 142).

Figura 142. Gráfica del SPI 6 meses (1981 a 2023)

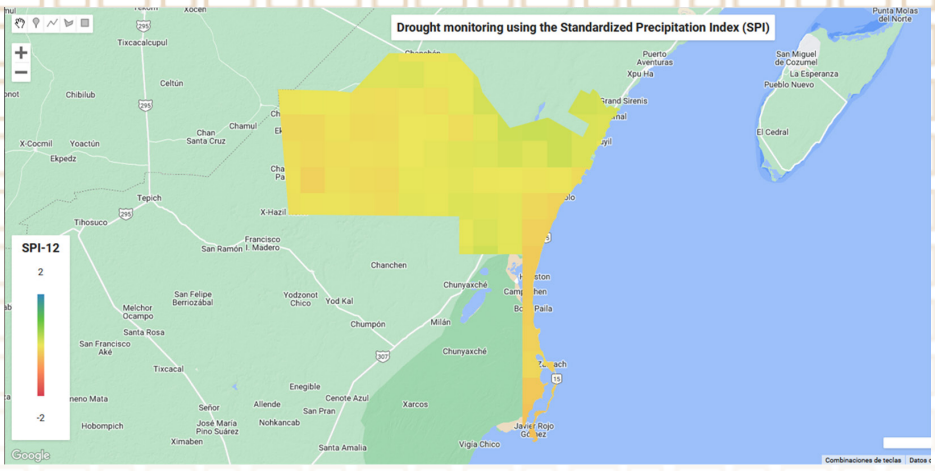


Fuente: Elaboración propia.

El SPI se puede calcular para diferentes escalas temporales (típicamente desde un mes a varios años) asociadas con la disponibilidad de diferentes tipos de recursos hídricos (humedad del suelo, agua subterránea, caudal de ríos, almacenamiento de reservorios). Entre estos las condiciones de humedad del suelo, estas responden a anomalías de precipitación en escalas relativamente cortas (3 y 6 meses), sin embargo, las anomalías a largo plazo, 12 meses o más, quedan reflejadas en las aguas subterráneas, caudales fluviales y almacenamiento de reservorios (OMM, 2012).

En este sentido, se calculó el SPI para 12 meses a través de la plataforma GEE, la cual se muestra en la figura 6. Se puede observar contrastes en todo el territorio, secciones más secas que otras, por ejemplo, hacia Punta Allen, al sur, se observan celdas con valores de sequía, al igual que oeste del municipio, por el contrario, al noreste del municipio la tendencia es más húmeda al igual que al sureste, lo que coincide con los sistemas de ríos subterráneos Ox Bel Ha (sur) y Sac Aktun (norte).

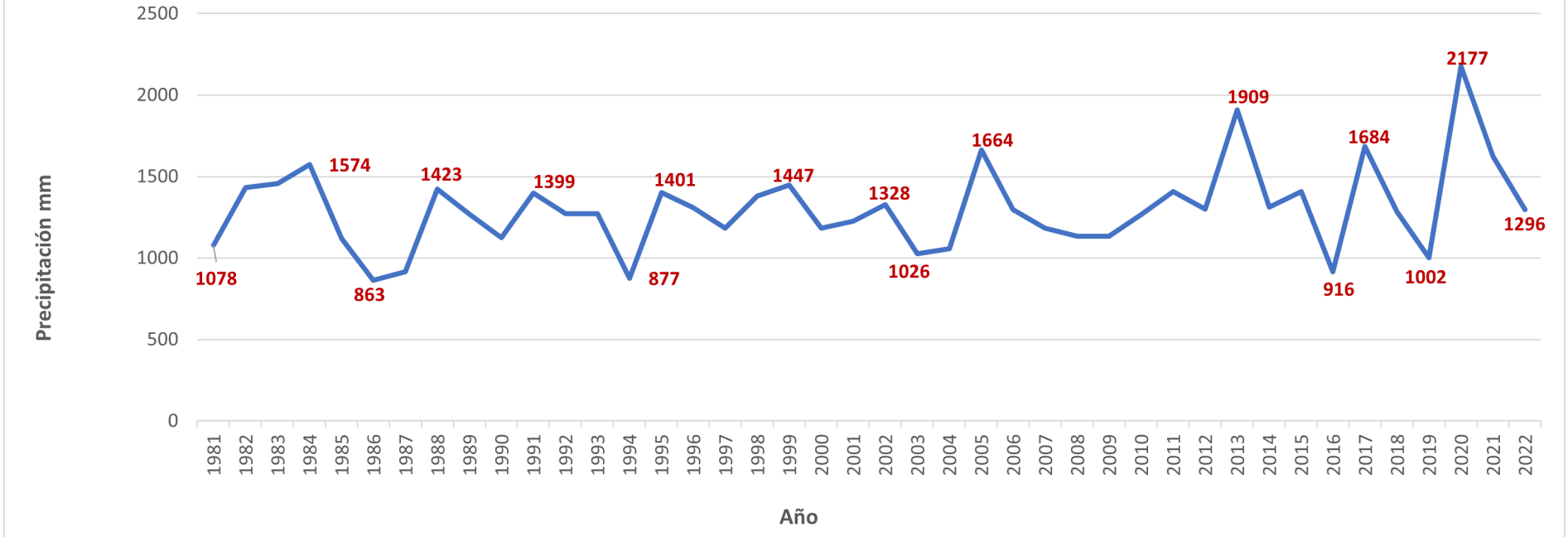
Figura 143. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) 12 meses



Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, al observar la acumulación de la precipitación a la escala de 12 meses tenemos que todos los valores acumulados se encuentran por arriba de los 800mm para todos los años y por la escala de análisis. El menor dato se indica para 1986 con 863mm y el mayor valor con 2,177 mm para 2020 (figura 144). Hay que recordar que el 2020 fue un año atípico en la temporada ciclónica lo que trajo mayor precipitación.

Figura 144. Gráfica de Precipitación acumulada 12 meses (1981 a 2023)

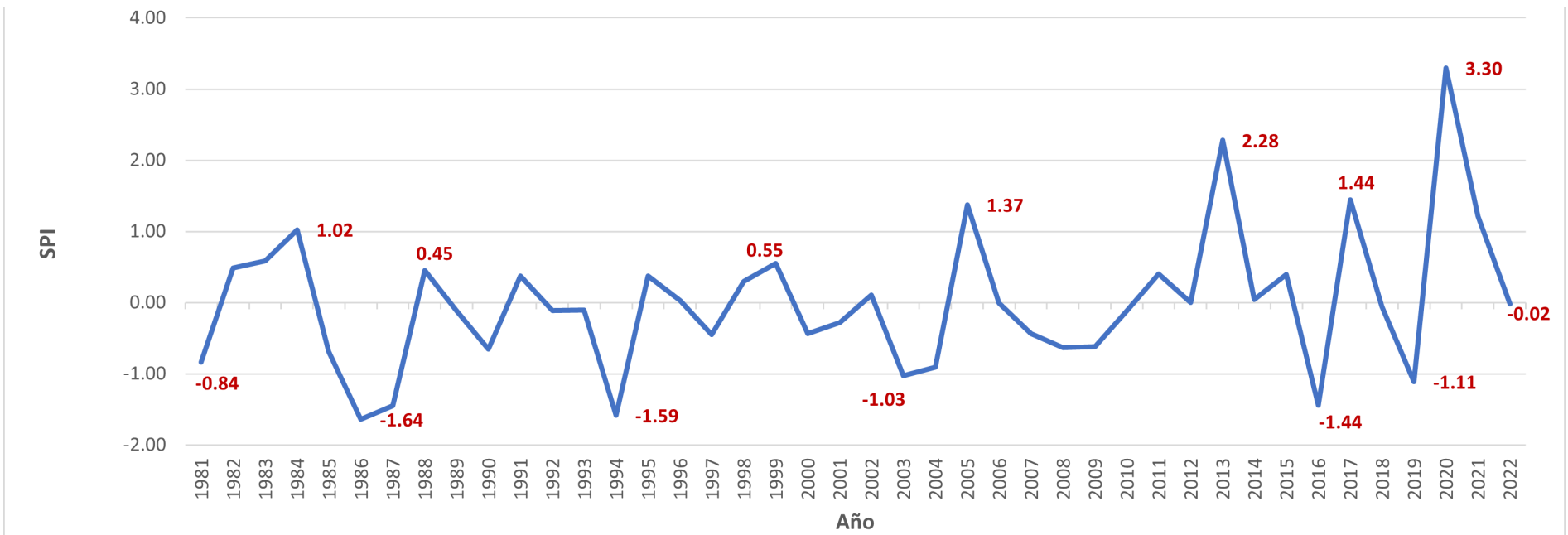


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 143, podemos observar que en 1981 la precipitación fue relativamente menor con leve sequía, en 2003, 2016 y 2016 los valores indican una sequía moderada con -0.84, -1.03 y -1.11 respectivamente. No obstante, para los años de 1986 y 1994, se observa periodos de sequía severa, lo que es cercano a 10 años, episodio que debió repetirse entre 2003 y 2004, pero solo alcanzo a ser sequía moderada. Por otro lado, se observa que en otros años se encuentra en niveles normales o aproximadamente normal de acuerdo con la escala de valores del índice. Es solo en 2005 cuando existen periodos moderadamente húmedos, siendo en 2013 extremadamente húmedo y que decir del año 2020 que el índice alcanza el valor de 3.30 (figura 145).

A partir de la tabla de clasificación de los valores que puede alcanzar el índice SPI se deben tener en cuenta los años previstos en que se repitan están condiciones para tomar medidas de prevención o mitigación ya sea el caso.

Figura 145. Gráfica del SPI 12 meses (1981 a 2023)



Fuente: Elaboración propia.

Con el segundo método utilizando procesos estadísticos a través de la paquetería de R se graficaron los datos obtenidos en el cálculo del SPI para 3 meses, 6 meses y 12 meses (figuras 146, 147 y 148). A continuación, por medio de geoprocesos se ponderaron los resultados obteniéndose mapas para los periodos secos (enero a junio) y periodos húmedos (julio a diciembre). Este estudio revela la situación/ocurrencia del fenómeno meteorológico de la sequía del municipio de Tulum.

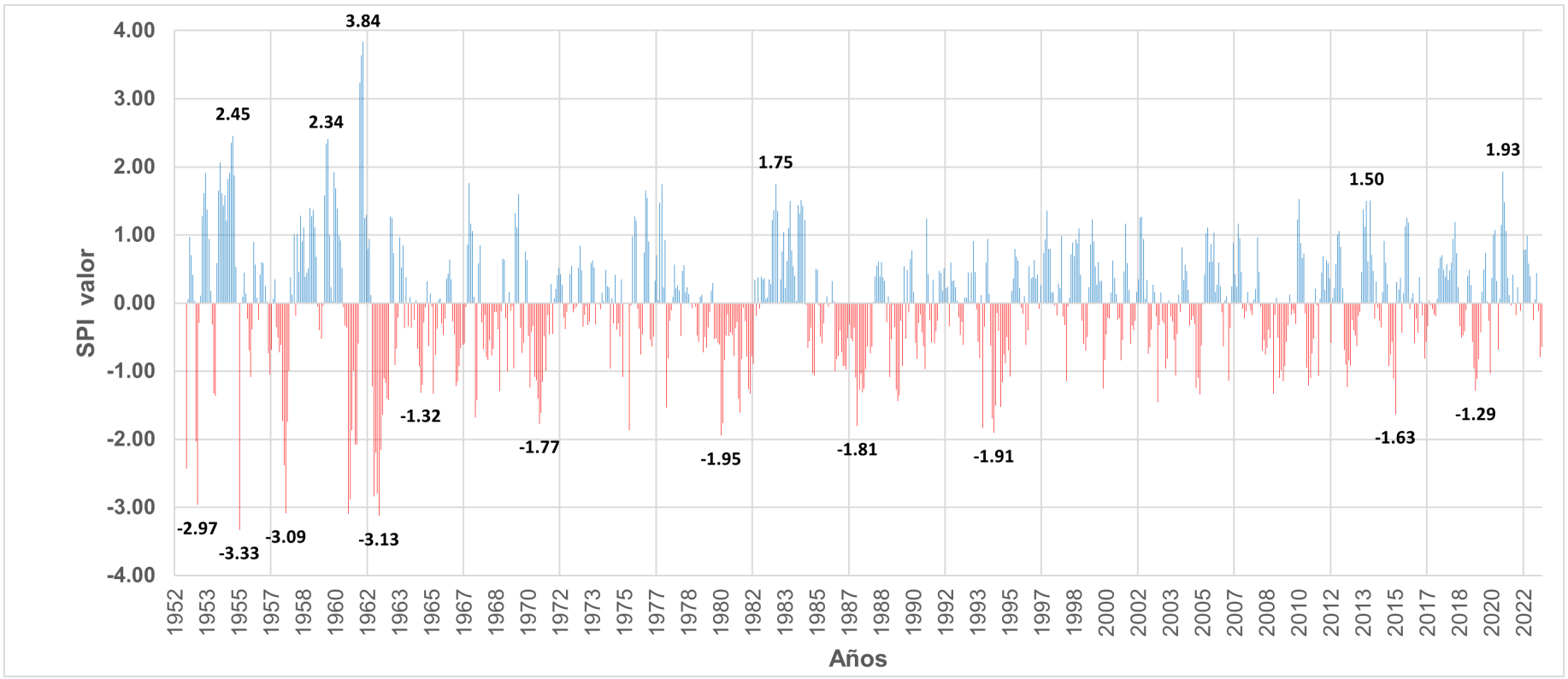
En la figura 146, para el índice SPI con periodicidad de 3 meses se observa eventos de sequía extrema (1955, 1957, 1962) hasta 1964 que el evento señala una sequía moderada (-1.32). Entre la década entre los años 50 y 60 también se advierte un periodo extremadamente húmedo en 1961 (3.84) el cuál tiene un periodo de frecuencia de 50 años que coincide con el año 2013. El año 2020 obtuvo un grado de muy húmedo, siendo coincidente con el método de GEE.

Cabe señalar que el uso de ambos métodos sirve para comparar la factibilidad de los datos, no es lo mismo trabajar con datos a partir de las imágenes de satélite usadas por GEE que con los datos de CONAGUA y sus estaciones meteorológicas, ya que éstas últimas tienen perdidas de datos y fallas técnicas que pueden afectar la lectura de estos. Asimismo, con el primero se comparan 42 años de datos y en el segundo 70 años. Sin embargo, son excelentes técnicas para comparar resultados.

El SPI de 3 meses a fines de febrero compara la precipitación total de diciembre, enero y febrero en un año determinado con la precipitación total de diciembre a febrero de todos los años registrados para esa ubicación. Cada vez que se agrega un año, se agrega un año adicional al período histórico reutilizando los valores para todos los años. No solo puede cambiar el valor, sino que cambiará al comparar histórica y estadísticamente el año actual con todos los registros de observaciones anteriores (OMM, 2012).

Es importante comparar el SPI de 3 meses con marcos de tiempo más largos. Pueden ocurrir períodos de tres meses relativamente normales o incluso húmedos durante sequías prolongadas que solo pueden observarse durante largos períodos de tiempo (OMM, 2012).

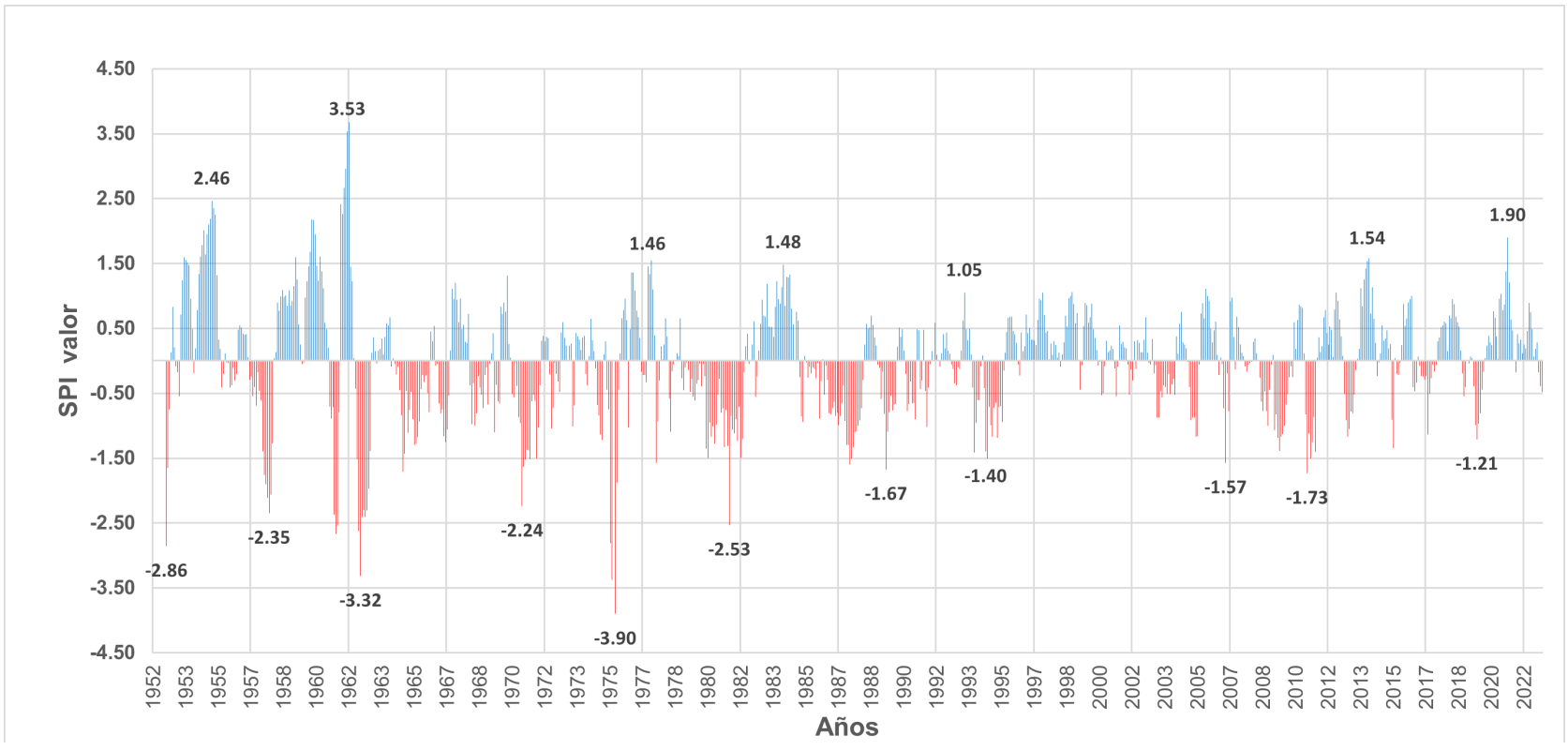
Figura 146. Gráfica del SPI 3 meses (1952 a 2022)



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los resultados del SPI 6 utilizando técnicas estadísticas en el software R, se observa en la figura 147 que, en 1952, 1957, 1962, 1970 y 1981 eventos de sequía extrema. Para los tres primeros entre uno y otro pasaron 5 años, posteriormente estos eventos fueron dándose en periodos más largos de 8 y 11 años. Por otra parte, en 1955 y 1961, fueron años extremadamente húmedos en los cuales el SPI alcanzo valores de 2.46 y 3.53 respectivamente. El periodo de sequía más reciente se da en 2019 como sequía moderada y en 2021 fue un año muy húmedo.

Figura 147. Gráfica del SPI 6 meses (1952 a 2022)



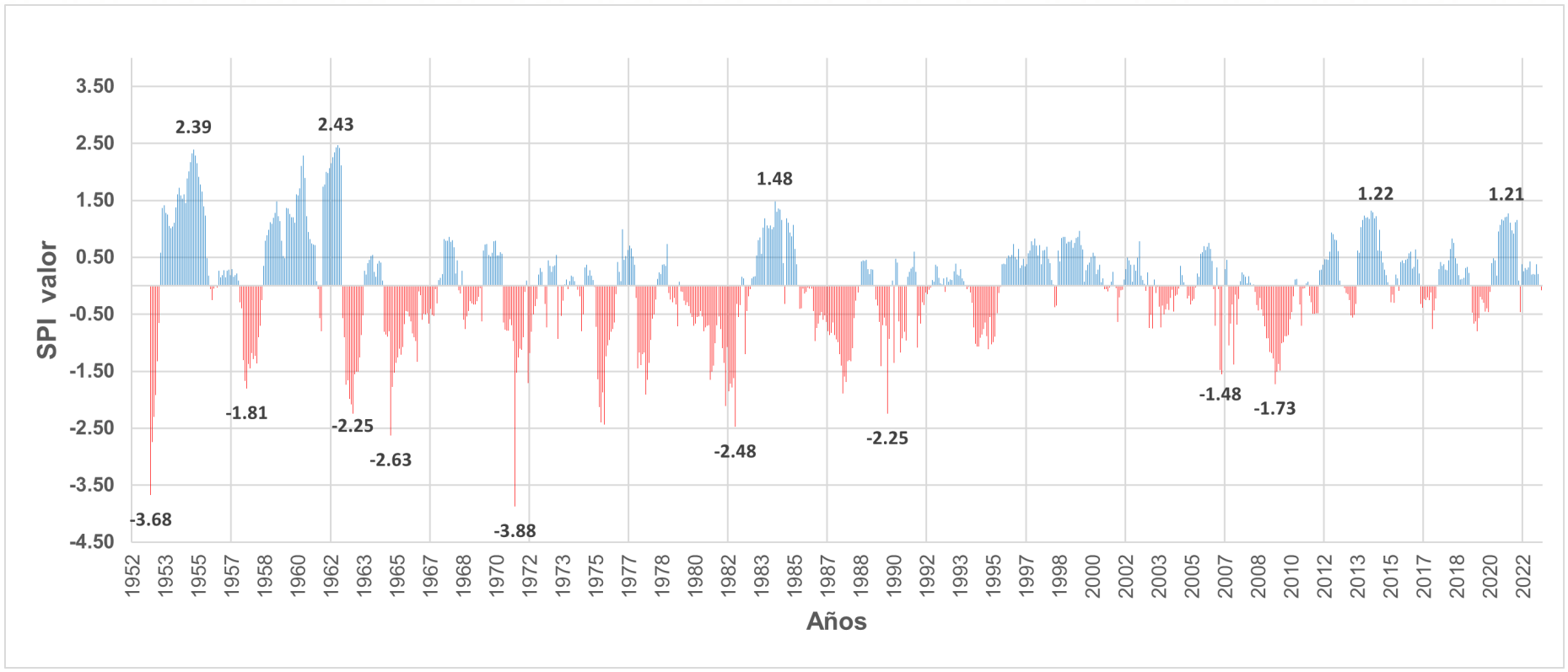
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 148 se muestra el SPI a 12 meses, la cual es una comparación de la precipitación de 12 meses consecutivos con la registrada en los mismos 12 meses consecutivos de los 70 años de análisis. A esta escala temporal refleja patrones de precipitación a largo plazo. Debido a que estas líneas de tiempo son el resultado acumulativo de períodos cortos de tiempo que pueden ser más altos o bajos de lo normal, el SPI a largo plazo tiende a estar cerca de cero a menos que haya una tendencia húmeda o seca (OMM, 2012).

En la misma gráfica observamos que 1952 se muestra un periodo de sequía extrema, tres años después en 1955 se presenta lo opuesto con un año extremadamente húmedo. Posterior para los años 1963, 1965, 1971, 1982 y 1990 también se presentan episodios con sequía extrema.

Cabe señalar que una de las desventajas de trabajar por estación es que Tulum no cuenta con estaciones que puedan registrar datos más al interior del territorio, eso hace que algunos datos no representen lo que en realidad sucede en el municipio. Los registros obtenidos con GEE presentan más consistencia con lo sucedido en esos 40 años de análisis.

Figura 148. Gráfica del SPI 12 meses (1952 a 2022)



Fuente: Elaboración propia.

Monitor de Sequía

El fenómeno climático que mayor impacto tiene en la actividad económica del país es la sequía. SMN se encarga de detectar el estado actual y la evolución de este fenómeno. Se apoya en el Monitor de Sequía en México (MSM) que a su vez forma parte del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM).

El Monitor de Sequía en México se lanzó en México en 2002 como parte de la actividad NADM, pero tomó carácter nacional recién en 2014, lo que permitió producir mapas de sequía no mensuales, siempre basados en la metodología USDM y NADM. Desde febrero de 2014, MSM se transmite cada dos semanas (SMN, 2023).

La metodología utilizada se basa en el proceso e interpretación de diversos índices o indicadores de sequía tales como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) que cuantifica las condiciones de déficit o exceso de precipitación (30, 90, 180, 365 días), Anomalía de Lluvia en Porciento de lo Normal (30, 90, 180, 365 días), Índice Satelital de Salud de la Vegetación (VHI) que mide el grado de estrés de la vegetación a través de la radiancia observada, el Modelo de Humedad del Suelo Leaky Bucket CPC-NOAA que estima la humedad del suelo mediante un modelo hidrológico de una capa, el Índice Normalizado de Diferencia de la Vegetación (NDVI), la Anomalía de la Temperatura Media, el Porcentaje de Disponibilidad de Agua en las presas del país y la aportación de expertos locales.

Como resultados estos índices se despliegan en capas o layers a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Por acuerdo se trazan polígonos para cada intensidad de sequía, generando archivos tipo shapefile. Cuando los polígonos corresponden al análisis de mediados de mes (emitido los días 15 de cada mes) se utilizan para cuantificar la sequía sobre el territorio nacional y cuando corresponden a la evaluación final de cualquier mes complementa además al mapa regional o continental del NADM (SMN, 2023). De acuerdo con la escala de intensidades del Monitor de Sequía de México, que va desde anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) hasta sequía excepcional (D4), ver tabla 98:

Tabla 97. Clasificación de la Intensidad de la Sequía de acuerdo con el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM)

CLASIFICACIÓN DE LA SEQUÍA DE ACUERDO CON EL MONITOR DE SEQUÍA		
Anormalmente Seco	Se trata de una condición de sequedad, no es una categoría de sequía. Se presenta al inicio o al final de un periodo de sequía. Al inicio de un período de sequía: debido a la sequedad de corto plazo puede ocasionar el retraso de la siembra de los cultivos anuales, un limitado crecimiento de los cultivos o pastos y existe el riesgo de incendios. Al final del período de sequía: puede persistir déficit de agua, los pastos o cultivos pueden no recuperarse completamente.	D0
Sequía Moderada	Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos; existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.	D1
Sequía Severa	Probables pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios es común la escasez de agua, se deben imponer restricciones en el uso del agua.	D2
Sequía Extrema	Pérdidas mayores en cultivos y pastos, el riesgo de incendios forestales es extremo, se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.	D3
Sequía Excepcional	Pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos, es probable una situación de emergencia debido a la ausencia de agua.	D4

Fuente: Elaboración propia con base en el SMN (2023).

Para el caso del municipio de Tulum, se tomaron los datos desde 2003 hasta 2022, exceptuando el año 2014 que no registra ningún dato (tabla 3). No obstante, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023) señala que, debido a factores externos, el Monitor de Sequía no se elaboró en agosto de 2003 ni en febrero de 2004. En recorrido de trabajo de campo se detecto sequía moderada para algunas localidades del municipio (figuras 149 y 150).

Tabla 98. Intensidad de sequía para Tulum.

Año / Mes	ene	feb	mar	abril	mayo	junio	julio	agosto	sep	oct	nov	dic
2003							D0					
2004						D0		D0	D1	D1	D1	D1
2005	D1	D1	D1	D1	D1	D0		D0				
2006				D0		D0				D0	D0	
2007		D1		D1	D1	D2	D0		D1	D1	D2	D2
2008	D2	D2	D0	D1	D1	D0						D0
2009	D0	D0	D0	D0	D0	D0	D1	D0	D2	D2	D1	D0
2010	D1	D1	D1	D1	D1	D2	D1			D0		
2011		D0	D0	D1	D2	D2	D1					
2014												
2015				D0	D0		D0	D0	D0	D0		
2016				D0	D0	D0	D0	D1	D1	D1	D0	D2
2017	D1	D0	D0	D0	D0	D0	D0					
2018			D0	D0	D0				D0	D0	D1	D0
2019	D0			D0	D0	D1	D1	D1	D2	D0	D0	
2020		D0	D0	D2	D1			D0	D0			
2021				D0	D0				D0	D0	D0	D0
2022							D0	D0		D0	D0	D1

Fuente: SMN 2023 (https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico).

El peligro por sequía para el municipio de Tulum de acuerdo con el monitor de sequía se puede observar en la tabla 99. Para 2003 solo se contabiliza el mes de junio con condición de desecación, solamente. En 2004 son los meses de septiembre a diciembre donde se presenta una sequía moderada, lo cual continua hasta los primeros meses de 2005 hasta mayo. En 2006 no se considera sequía. Es hasta 2007 donde los meses de febrero, abril, mayo, septiembre y octubre que indican sequía moderada pero los meses de junio, noviembre y diciembre ya llega a ser una sequía severa. Con esta condición existe probabilidad de pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios y escasez de agua. Estos episodios se repiten en enero y febrero de 2008; septiembre y octubre de 2009; junio de 2010; mayo y junio de 2011; diciembre de 2016; septiembre de 2019 y abril de 2020.

Figura 149. Sequía moderada Cobá, Tulum 2023.





Sequía moderada: Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos; existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.

Fotos: Trabajo de campo 2023.

Figura 150. Anormalmente seco San Juan de Dios y Manuel Antonio Ay, Tulum 2023.

Localidad de San Juan de Dios



Localidad de Manuel Antonio Ay



Anormalmente seco: Condición de sequedad, debido a la sequedad de corto plazo puede ocasionar el retraso de la siembra de los cultivos anuales, un limitado crecimiento de los cultivos o pastos y existe el riesgo de incendios.

Fotos: Trabajo de campo 2023.

Se advierte que en el municipio de Tulum la amenaza de sequía no representa un gran peligro siendo que solo a alcanzado condición de sequía en su mayoría. No obstante, los episodios de sequía severa si deben tomarse en cuenta y cruzarse con información de incendios en el territorio. Si bien el incendio de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an se presentó en julio de 2019 en condiciones de sequía moderada, podría ser la causa de la sequía severa del mes de septiembre de ese año.

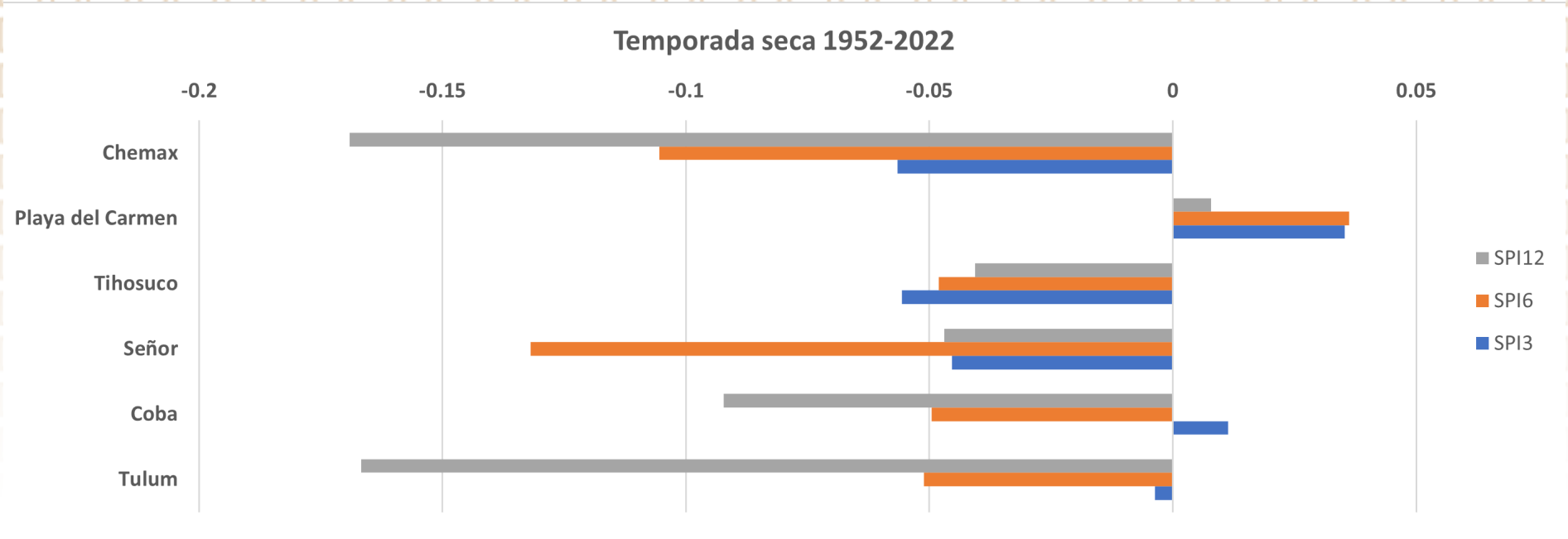
5.3.2.4. Mapas resultantes

A continuación, y con los datos resultantes del cálculo del índice SPI con R, se estimaron los promedios por año y estación meteorológica, para después obtener un promedio general de años con series completas, clasificándolos en periodos de secas y periodos húmedos, para mapear las condiciones de sequía espacial y temporalmente a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los mapas resultantes de sequía se muestran en las figuras 151 y 152, en la primera se muestra el periodo de secas, de enero a junio, para 3 meses, 6 meses y 12 meses. En la segunda se muestra el periodo húmedo de julio a diciembre. Si bien, se definieron así los periodos el comportamiento de la precipitación a lo largo de los 70 años de estudio puede ser variable entre meses y entre años.

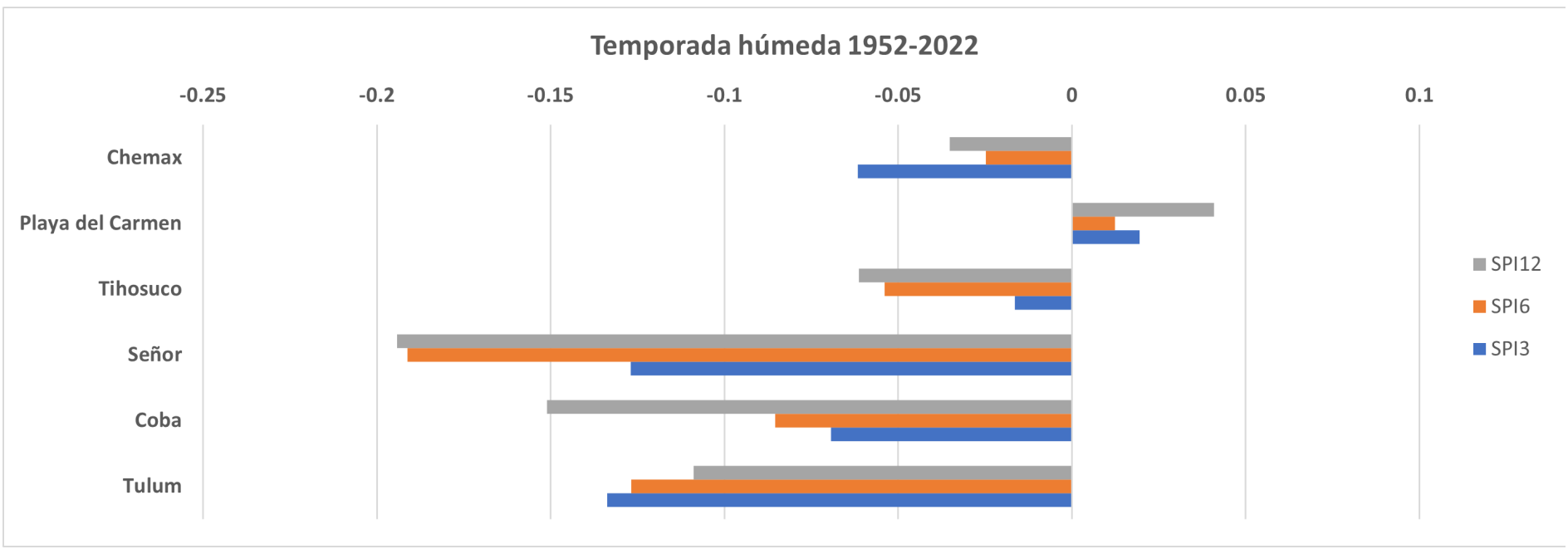
De la misma manera, se graficaron los datos obtenidos, se muestran en las figuras 151 y 152. Se exponen los datos para las 6 estaciones meteorológicas empleadas para el análisis. Las estaciones de Chemax y Tulum para el SPI 12 expone periodos ligeros de sequía. La mayor parte indica eventos de sequía ligeramente seca, solo la correspondiente a Playa del Carmen indica periodos ligeramente húmedos.

Figura 151. Gráfica del Promedio por estación con Rstudio SPI de 3,6 y 12 meses de enero a junio



Fuente: Elaboración propia

Figura 152. Gráfica del Promedio por estación con Rstudio SPI de 3,6 y 12 meses de julio a diciembre



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 152 se observan las diferencias por escalas de tiempo para el SPI, siendo Señor, Cobá y Tulum las que indican periodos de sequía ligeros, pero con duración variable.

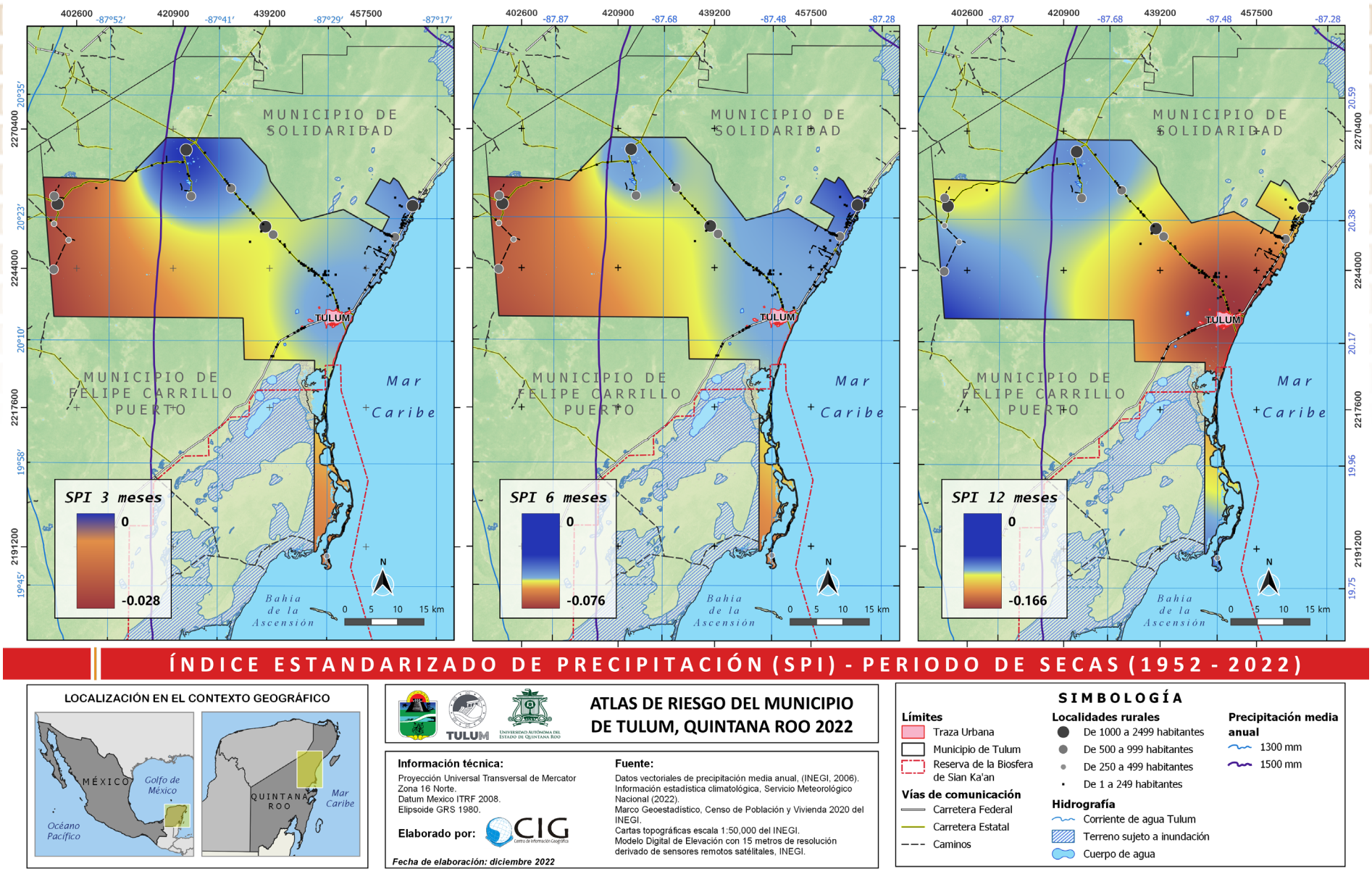
Posteriormente a los datos ya citados, se les aplico el algoritmo de interpolación IDW (Inverse Distance Weighted) dentro de un Sistema de información Geográfica, utilizando el software QGIS 3.x. Se eligió la interpolación IDW por que genera una interpolación a partir de una capa vectorial de puntos (estaciones meteorológicas). Con este se crearon los mapas resultantes (figuras 153 y 154).

El SPI de 3 meses compara la cantidad de precipitación en un período específico de 3 meses con la cantidad total de precipitación en el mismo período de 3 meses para todos los años incluidos en los datos históricos (70 años). El SPI de 3 meses refleja las condiciones de humedad a corto y medio plazo, y proporciona una estimación estacional de la precipitación. Asimismo, un SPI de 3 meses en una gran área agrícola puede ser más efectivo para resaltar la presencia de condiciones húmedas, por ejemplo, a fines de mayo daría una idea de las condiciones de humedad del suelo cuando se da el comienzo de la temporada de crecimiento. En las figuras 153 y 154 el SPI de 3 meses muestra cambios en el patrón de precipitación para ambos periodos, sin embargo, no así en la cantidad de humedad, en la primera se muestra al norte y al este y en la segunda, la porción centro y noroeste del municipio.

El SPI de 6 meses compara la lluvia de ese período con los datos históricos del mismo período de 6 meses para los 70 años. Indica tendencias de precipitación entre estacionales y el medio plazo. El SPI de seis meses puede mostrar la cantidad de precipitación de octubre a marzo, la temporada de monzones más importante. Lo que podemos apreciar en las figuras 153 y 154, en la primera las regiones húmedas corresponden a la parte noroeste del municipio en y en la segunda figura se observa al noroeste. Asimismo, un SPI de seis meses también puede reflejar anomalías locales y estacionales en el caudal del río y los niveles de los embalses (OMM, 2012).

El SPI a 12 meses en esta escala de tiempo generalmente se asocia con lechos de ríos, niveles de embalses y niveles freáticos en escalas de tiempo más largas, lo que se puede observar, principalmente, en la figura 154. Mirar escalas de tiempo largas puede ayudar a evitar conceptos erróneos que llevan a la idea de que la sequía puede haber terminado, cuando en realidad se trata tan solo de un período húmedo temporal. Es primordial hacer un seguimiento continuo y persistente de la sequía para determinar cuándo comienza y termina. Con lo anterior, se podrían crear Sistemas de Alerta Temprana para periodos largos de sequía o asociarlos a la amenaza de inundaciones cuando la índice marca extremos muy húmedos.

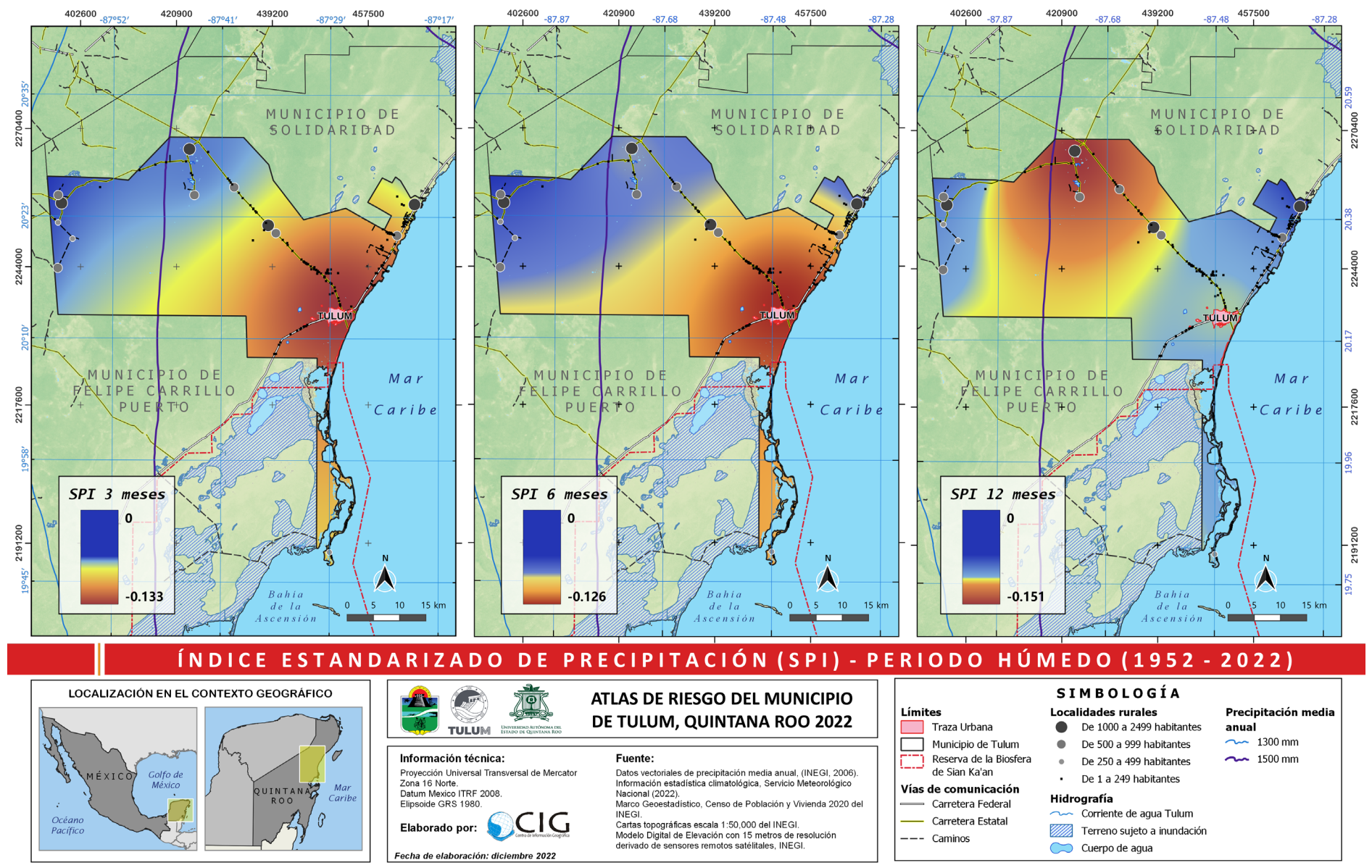
Figura 153. Mapa resultante de susceptibilidad a sequía periodo de secas



ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI) - PERIODO DE SECAS (1952 - 2022)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 154. Mapa resultante de susceptibilidad a sequía periodo húmedo



ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI) - PERIODO HÚMEDO (1952 - 2022)

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3. Heladas

Los eventos de heladas dañan principalmente la agricultura y pueden afectar la salud de la población en áreas rurales y urbanas. En primer lugar, las personas que viven en casas con materiales frágiles o los necesitados, niños y adultos mayores son los más afectados.

Las heladas son fenómenos meteorológicos que consiste en un descenso de la temperatura ambiente a niveles inferiores al punto de congelación del agua y hace que el agua o el vapor que está en el aire se congele depositándose en forma de hielo en las superficies. Son períodos de bajas temperaturas, con varios grados bajo cero.



Influyen la altitud y la orientación topográfica: montañas, mesetas, valles, así como tipo de suelo y cubierta vegetal. En México, las heladas y las bajas temperaturas ocurren esencialmente, durante los meses de noviembre a marzo, siendo diciembre y enero los de mayor impacto.

Figura 155. Helada en el norte de México.



Fuente: htdtps://columnadigital.com/preven-heladas-en-el-75-por-ciento-del-territorio-mexicano/

Cuando se presenta esta amenaza, se observan daños en tuberías de conducción (agua, gas), placas de hielo en calles y carreteras, más consumo de energía debido a las necesidades de calefacción. Se conoce como día de helada aquel en que la temperatura mínima del aire es igual o inferior a 0 °C.

Figura 156. Efectos de las heladas en viviendas.



Fuente: https://www.themarkethink.com/estilo-de-vida/como-cuidar-tuberias-frio/

Por su ubicación geográfica, altura y topografía, el municipio de Tulum no se encuentra amenazada por este tipo de fenómeno meteorológico. No sucede en las zonas costeras, ni en la Llanura del Pacífico, tampoco en las vertientes del Golfo de México, al sur del río Pánuco, la Península de Yucatán y el Istmo de Tehuantepec.

5.3.4. Tormentas de granizo

El granizo es un fenómeno meteorológico en el que caen como precipitación partículas de hielo de más de 5 mm de diámetro. Las granizadas ocurren n muchas áreas del mundo y están asociados con daños significativos en la superficie. Es decir, afecta seriamente los cultivos, la infraestructura humana e incluso la vida humana.

Figura 157. Caída de granizo en la selva de Quintana Roo



Fuente: Trabajo de campo, 2023

Para estudiar las tormentas de granizo es necesario saber en qué condiciones o en que entornos medioambientales estas se producen. Suelen estar asociadas a situaciones de inestabilidad atmosférica, fuertes corrientes ascendentes y sistemas convectivos bien organizados.

Existen pocas referencias datos sobre las granizadas en México, y más para el Estado de Quintana Roo. Entre los estudios que se han hecho se encuentra el de León-Cruz, et al. (2023), que sin embargo solo emplean datos de 1981 a 2018 para subregiones en que dividen al país. Para la subregión de la Península de Yucatán (PY) solo trabajan con 6 estaciones que en el periodo de 37 años se detectaron 93 granizadas de acuerdo con las bases de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Origen y características

El granizo se forma durante las tormentas eléctricas cuando las gotas de agua o los copos de nieve formados en las nubes cumulonimbos son transportadas verticalmente por las corrientes de aire turbulentas características de las tormentas eléctricas. Las piedras de granizo crecen como consecuencia de los choques sucesivos de estas partículas de agua fría, agua que se encuentra por debajo de su punto de congelación, pero permanece líquida. Esta agua flota en nubes en movimiento. Cuando las partículas de granizo son demasiado pesadas para que las corrientes de aire las soporten, la gravedad las obliga a caer al suelo.

Es decir, cuando la tormenta es producida por el ascenso de una columna de aire caliente, en el ascenso el aire se enfría hasta alcanzar la misma temperatura que el entorno, y desciende (figura 148). En el descenso vuelve a calentarse hasta alcanzar la temperatura necesaria para volver a ascender. La convección es uno de los tres principales mecanismos con los que es posible el transporte de calor ademas de la radiación, y la conducción.

Los granizos varían en diámetro de 2 milímetros a 13 centímetros, y las piedras de granizo más grandes pueden ser muy destructivos. Ocasionalmente, una serie de rocas pueden solidificarse en una masa grande, uniforme y pesada de hielo y nieve. Los fenómenos atmosféricos asociados a la convección son denominados convectivos y suelen clasificarse en una gran multitud de variedades dependiendo de sus dimensiones espaciales, de su resolución temporal, de su organización o del tipo de tiempo producido. Estos fenómenos, en sus formas más violentas, provocan lluvias fuertes, granizo de gran tamaño (>19 mm), fuertes vientos o tornados.

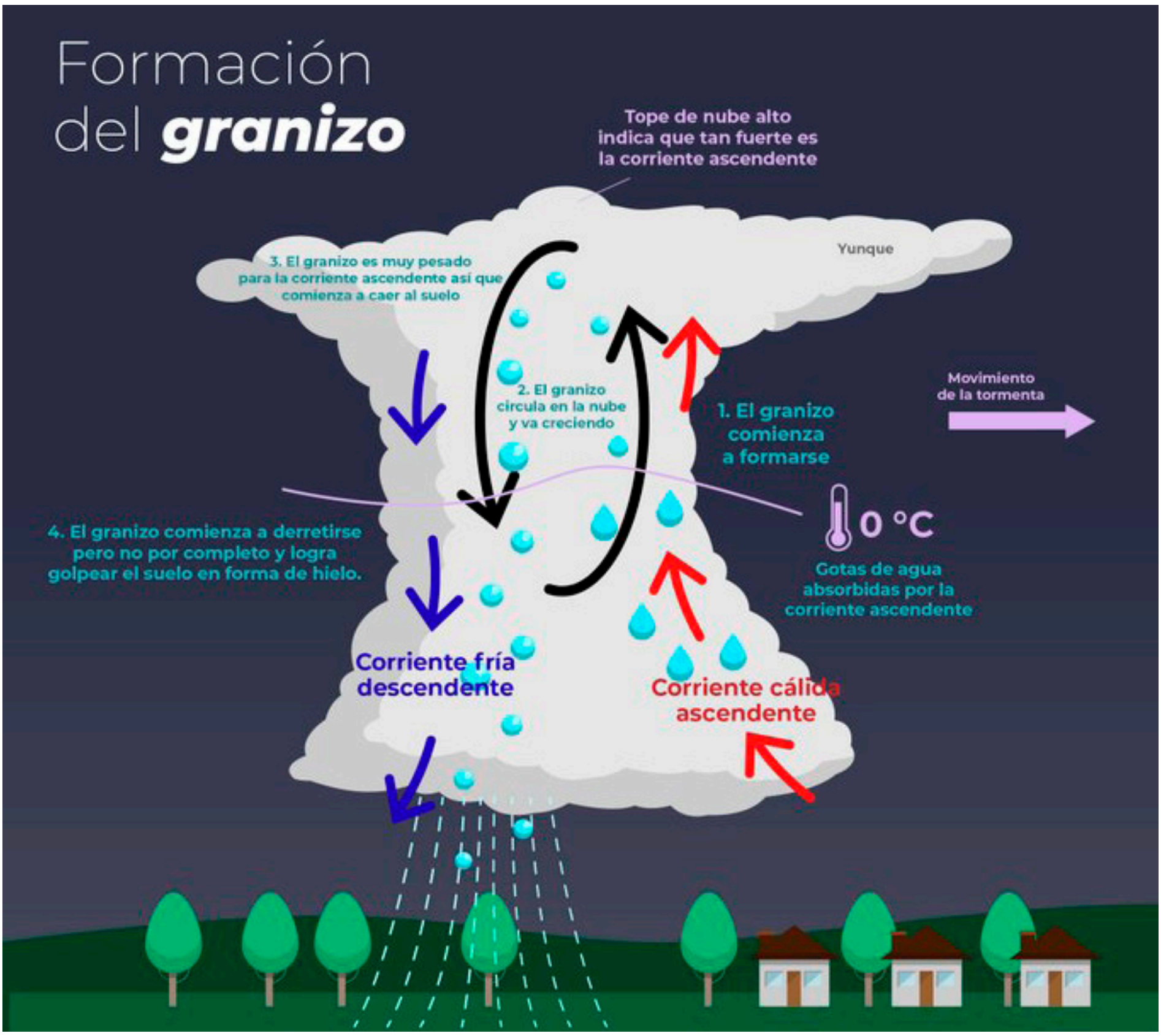
Periodo de ocurrencia de tormentas de granizo o granizadas

El depósito del granizo sobre la superficie terrestre exhibe un patrón angosto y largo a manera de un corredor. La mayoría de las tormentas de granizo ocurren durante el verano entre los paralelos 20 y 50, tanto en el hemisferio norte como en el sur (CENAPRED, 2012). Estas granizadas pueden iniciar en el mes de marzo y terminar en junio, debido a que en esta época del año disminuye la influencia de los frentes fríos o nortes fuertes, iniciándose la temporada cálida.

León-Cruz, Caetano, Cortés-Ramos, Dominguez & Méndez-Pérez (2023) señalan que su distribución estacional indica que las tormentas de granizo generalmente ocurren desde el final de la primavera hasta principios de otoño (de mayo a octubre) en horario de tarde y noche. También indican que los ambientes de alta inestabilidad y la diferencia en la velocidad del viento o su dirección entre dos puntos en la atmósfera terrestre convergen durante la primavera, especialmente en la subregión del Golfo de México y la Península de Yucatán, lo que parece aumentar la probabilidad de convección organizada y varios peligros convectivos.

CENAPRED (2012) señala que en México se registran granizadas principalmente en la región del altiplano, particularmente en los valles de la porción sur de éste y en la Sierra Madre Occidental, así como en la Sierra Madre del Sur y algunas regiones de Chiapas, Guanajuato, Durango y Sonora. Las ciudades que con mayor frecuencia son afectadas, son Puebla, Pachuca, Tlaxcala, Zacatecas y la ciudad de México donde se tiene la mayor incidencia durante los meses de mayo, julio y agosto. Por lo que para Quintana Roo y el municipio de Tulum esta afectación tendría poca probabilidad de ser considerado con un grado alto de peligrosidad.

Figura 158. Formación del granizo



Fuente: Infografía CONAGUA (https://twitter.com/conagua_clima/status/1393272658498777088)

Potencial de afectación

La magnitud de daño que puede causar una tormenta de granizo depende de la cantidad y el tamaño del granizo.

Zonas rurales: El granizo destruye cultivos y plantaciones. A veces provocan la muerte de animales. En viviendas con tejados de cartón ondulado, materiales naturales, etc., los daños pueden ser graves.

Áreas Urbanas: Afecta viviendas, edificios y espacios verdes. En ocasiones se acumula granizo en los desagües en cantidad suficiente, obstruyendo el paso del agua y formando charcos e inundaciones durante varias horas. El granizo en un techo poco fiable es peligroso para la estabilidad de las viviendas.

Cualquier tormenta que produce granizo que llega al suelo se conoce como granizada. Un cristal de hielo con un diámetro de >5 mm (0.20 pulgadas) se considera granizo. Los granizos pueden crecer hasta 15 cm y pesar más de 0.5 kg. Para el municipio de Tulum no se llevan registros por tormentas de granizo, pero se han detectado amenazas frecuentes en estaciones no dentro de su territorio, pero si colindantes, detectando casos eventuales, como se muestra en la tabla 99.

Las lluvias de mayo y junio de 2023 registraron caída de granizo en el municipio de Tulum, con granizos de poco diámetro (figura 149). Si bien el daño por granizo ha aumentado en los últimos años, hay evidencia de que este aumento está más impulsado por el desarrollo humano que por un aumento en las tormentas de granizo. De acuerdo con Gallagher (2000) las tormentas eléctricas severas que contienen granizo pueden exhibir una coloración verde característica (figura 159).

Lo anterior apunta que es en la región noroeste del municipio donde se han presentado más este tipo de fenómenos atmosféricos. Sin embargo, a pesar de estos registros pueden existir registros no contabilizados, por lo que se recomienda verificar datos de otras estaciones meteorológicas.

La región noroeste del municipio donde se han presentado más este tipo de fenómenos atmosféricos. Sin embargo, pueden existir registros no contabilizados, por lo que se recomienda verificar datos de otras estaciones meteorológicas.

Figura 159. Tormenta de granizo en Manuel Antonio Ay, Tulum.



Fuente: Foto de campo 2023.

Figura 160. Tormenta eléctrica carretera Cobá -Tulum.



Fuente: Foto de campo 2023.

5.3.4.1. Metodología

El granizo ocurre con mayor frecuencia en el interior de los continentes en latitudes medias y es menos común en los trópicos, a pesar de que la frecuencia de las tormentas eléctricas es mucho mayor que en las latitudes medias (Hand & Cappelluti, 2011). La actividad intensa del verano en casi todas las subregiones de México está asociada con la actividad tropical, como las olas heladas y los ciclones tropicales (León-Cruz, et al., 2023). De acuerdo con los datos registrados en las estaciones utilizadas para el análisis de fenómenos hidrometeorológicos para este Atlas de Riesgo solo la estación 23024 ubicada en la localidad de TIHOSUCO (23024) en marzo de 1986 se registró una granizada, en mayo de 1981 y 1986, también. Al igual que en junio y julio de 1989. Por último, en 1997 se capturo de una eventualidad. El resto de las estaciones no registro actividad.

Tabla 99. Tormentas de granizo para Tulum.

Estación	Año/mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
23025 TULUM	1964-2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23012 COBÁ	1971-2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23022 SEÑOR	1971-2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23024 TIHOSUCO	1952-2018	-	-	1 (1986)	-	2 (1981, 1986)	1 (1989)	1 (1989)	-	1 (1997)	-	-	-
23163 PLAYA DEL CARMEN	1998-2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31069 CHEMAX	1978-2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

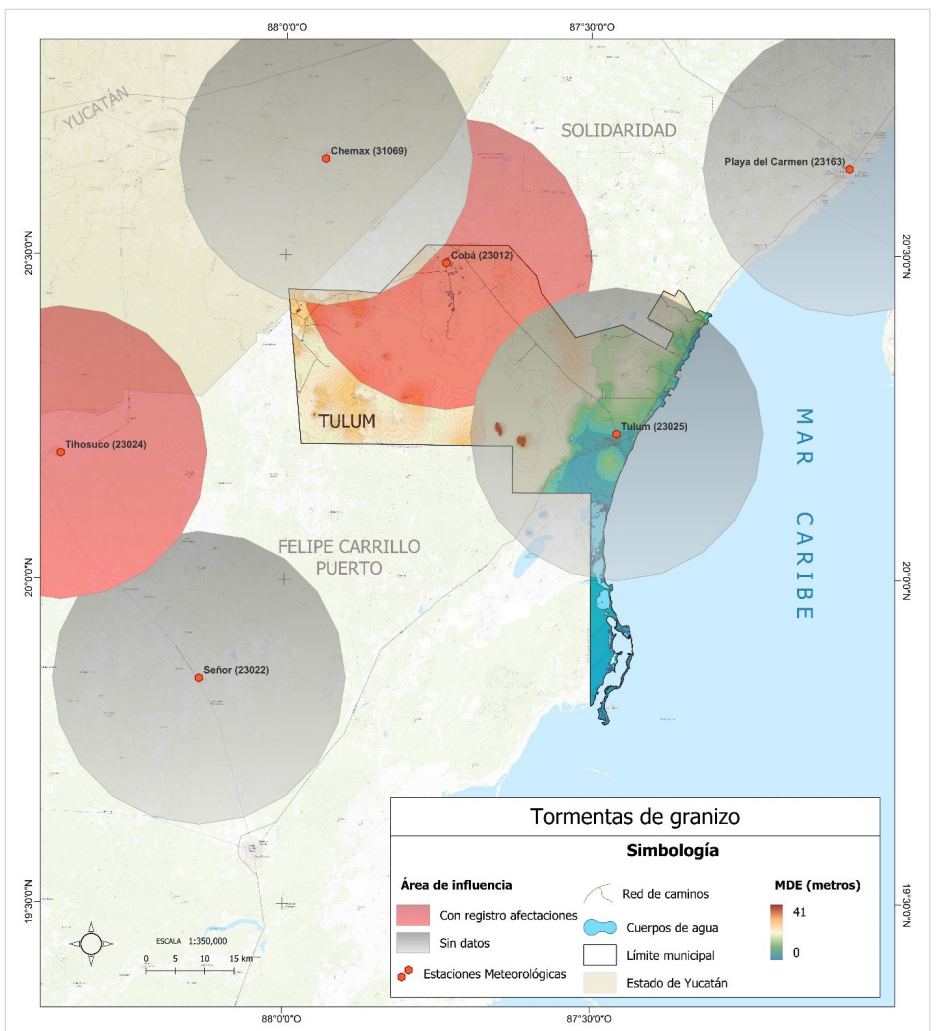
Fuente: CONAGUA (2023). Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Proyecto de Bases de Datos Climatológicos

5.3.4.2. Mapas resultantes

Con los datos obtenidos del SMN y CONAGUA, así como trabajo in situ, y a través de herramientas de geoprocesamiento, se identificaron áreas de influencia con relación a la localización de las estaciones meteorológicas que han registrado datos de granizadas al interior del municipio de Tulum. Lo que permitió obtener nueva información para determinar, qué áreas geográficas se encuentran dentro de un área de influencia determinada con algún grado de peligro a tormentas de granizo.

En general, las granizadas en México son frecuentes durante el verano y principios de otoño. La subregión de la Península de Yucatán concentra la actividad del granizo durante la estación fría, el invierno y principios de la primavera y es probablemente modulada por la actividad del sistema frontal (León-Cruz et al., 2023). No obstante, hay evidencia de tormentas eléctricas y granizo en los meses de mayo y junio. La investigación sobre peligros convectivos podría ser útil para mejorar el pronóstico del tiempo y reducir los riesgos de desastres asociados con los peligros meteorológicos en México.

Figura 161. Mapa resultante de susceptibilidad a tormentas de granizo



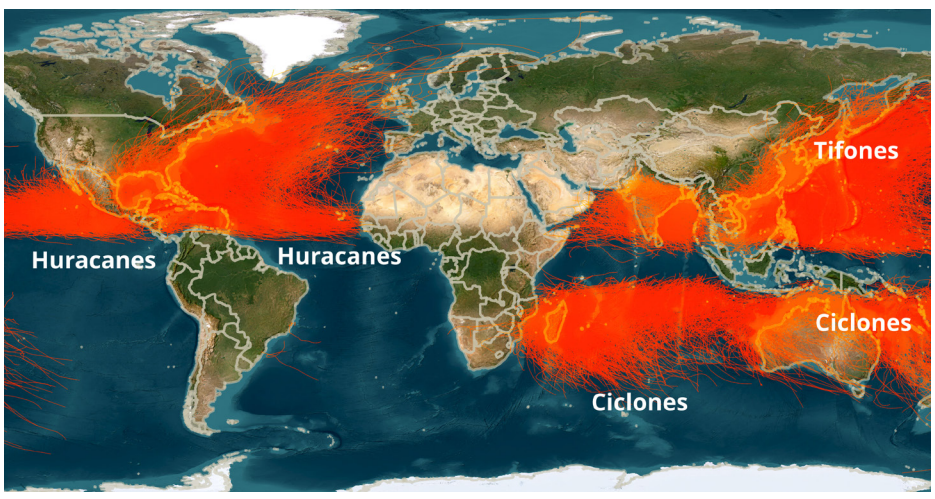
Fuente: Elaboración propia.

5.3.5. Ciclones tropicales

En México, es un país que se encuentra en una zona geográfica propensa a diversos riesgos hidrometeorológicos debido a su ubicación geográfica y características climáticas. Este tipo de riesgos tienen importantes repercusiones, positivas y negativas. Las cuales están determinadas por factores como la ubicación geográfica y los diversos sistemas meteorológicos que afectan al país, pero sobre todo por la distribución de su población, las grandes disparidades en las condiciones de vida de la misma y por el dinamismo de la actividad humana, principalmente el crecimiento poblacional, que en algunas partes intenso, y en otras por fenómenos migratorios (SINAPROC-CENAPRED, 2004). Los efectos tambien pueden incrementarse por factores como la deforestación y el cambio climático, lo que hace aún más importante tomar medidas de prevención y preparación para minimizar su impacto en la población y la economía del país.

El término científico para todas las tormentas de rápida rotación, originadas en los océanos tropicales, es ciclón tropical. Sin embargo, en su etapa más intensa, son conocidos por varios nombres según las regiones en donde ocurren (SINAPROC-CENAPRED, 2004) (figura 162): Huracanes (Océano Atlántico, Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe); Ciclones (Mar de Arabia, Océano Índico, al este de Isla Mauricio, Madagascar y Bangaldesh) y Tifones (China y la costa de Japón).

Figura 162. Cuencas ciclónicas a nivel mundial

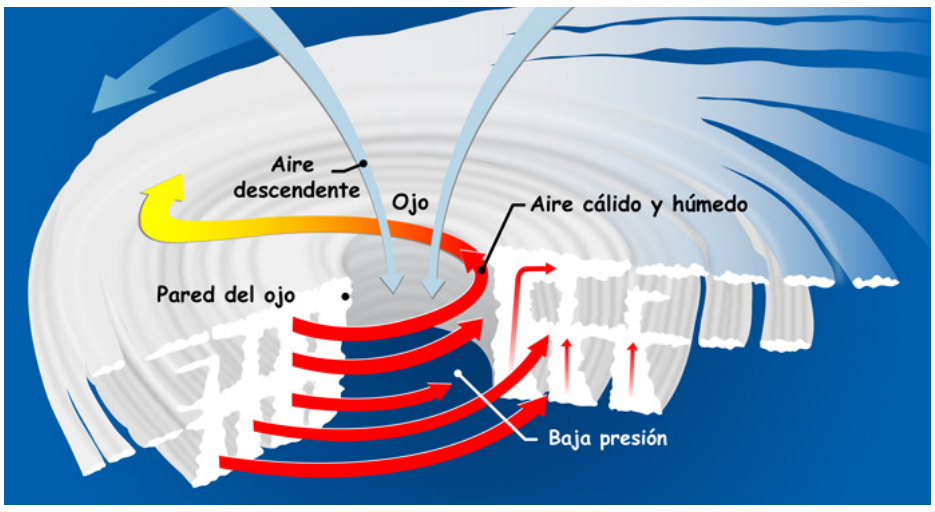


Fuente: https://spaceplace.nasa.gov/hurricanes/sp/

Se originan en el mar entre las latitudes 5° a 15°, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en la época en que la temperatura del agua es mayor o igual a 26°C (Rosengaus Moshinsky, Michel; Jímenez Espinosa, Martín ; Vázquez Conde, María Teresa, 2002).

Se caracterizan por una circulación cerrada (con una rotación en sentido antihorario en el hemisferio norte y en el sentido horario en el hemisferio sur) alrededor de un centro de baja presión (ojo[3]) que produce fuertes vientos (en algunos casos velocidades superiores a los 300 km/h.) y lluvias muy intensas (que pueden producir inundaciones a más de 40 km hacia el interior en lugares de escasa pendiente). La combinación de olas formadas por el viento y la baja presión de un ciclón tropical puede producir una marea de tormenta —un enorme volumen de agua impulsado hacia la costa a gran velocidad y con una fuerza inmensa que puede arrastrar las estructuras a su paso y causar daños importantes al medio ambiente costero—(National Hurricane Center, 2011). Su diámetro suele ser de unos 200 a 500 km, pero puede alcanzar los 1,000 km.

Figura 163. Esquema de la forma un huracan



Fuente: https://spaceplace.nasa.gov/hurricanes/sp/

3 Parte central del sistema donde no hay nubes y las condiciones meteorológicas son por lo general tranquilas.

Durante el desarrollo de estos fenómenos, si las condiciones continúan siendo favorables (principalmente la temperatura elevada del mar), la perturbación tropical se intensifica y cuando penetran en tierra o si las condiciones alrededor del sistema se deterioran, pierden su fuerza y se disipan.

Las condiciones ambientales para la formación de los ciclones son:

- Temperatura del mar de 27 a 28° C, desde una profundidad de 46 metros, que permite generar una rápida evaporación (temperaturas de las latitudes intertropicales - trópicos de Cáncer y Capricornio - con temperaturas ambientales superiores a los 26° C).
- Evaporación intensa para que se origine una zona de baja presión en el mar, que será el ojo del huracán cuando éste se forme.
- Entrada continua de aire frío en las capas altas de la atmósfera.
- Tormentas eléctricas, causadas por la fricción que se genera entre la atmósfera y el mar por los fuertes vientos que se registran en el proceso de formación del huracán.
- Vientos que provenientes de la zona conocida como Sahel, en el Sahara del continente africano, los cuales se desplazan en las capas bajas de la atmósfera hacia los centros de baja presión que se forman en las áreas marinas, en este caso en el océano Atlántico, en el mar de las Antillas y en el mar Caribe.

Dependiendo de la magnitud de los vientos y de la cantidad de precipitación que puede generar se clasifican en diferentes categorías: Depresión tropical, Tormenta tropical, Huracán. En función de la velocidad de los vientos máximos sostenidos, los ciclones tropicales se designan de la siguiente manera:

- **Depresión tropical**, sistema organizado de nubes y tormentas eléctricas con una circulación cerrada; velocidad de los vientos máximos sostenidos es inferior a 63 km/h;
- **Tormenta tropical**, sistema organizado de fuertes tormentas eléctricas con una circulación bien definida que muestra la distintiva forma ciclónica; velocidad de los vientos máximos sostenidos es superior a 63 km/h; a este tipo de tormentas se le pone nombres;
- **Huracán, tifón, ciclón tropical severo o tormenta ciclónica severa**, según la cuenca, cuando la velocidad de los vientos máximos sostenidos es superior a 116 km/h.

La escala de vientos huracanados de Saffir-Simpson categoriza la fuerza de los huracanes en rangos del 1 al 5 basada en la intensidad del huracán en el momento indicado. La escala fue desarrollada por el ingeniero Herb Saffir y el meteorólogo Bob Simpson en 1969 y ha sido una herramienta para alertar la población sobre los posibles impactos de huracanes de diversa intensidad. La escala proporciona ejemplos del tipo de daños e impactos con vientos con la intensidad indicada. En general, el daño aumenta en un factor de cuatro por cada aumento de categoría.

La velocidad máxima sostenida del viento en la superficie[4] asociada con el ciclón es el factor determinante en la escala. La escala no aborda el potencial de otros impactos relacionados con huracanes, como marea de tormenta, inundaciones inducidas por lluvia y tornados. Además, es importante considerar que las descripciones de los daños provocados por el viento están influenciadas en cierta medida por los códigos de construcción locales actuales y qué tan eficaz y por cuánto tiempo se han implementado. Los daños ocasionados por vientos de huracán también están altamente relacionados con otros aspectos, como la duración de los vientos intensos, las variaciones en la dirección del viento y la edad de las construcciones.

Según la escala de Saffir-Simpson, utilizada en el mar Caribe, el golfo de México, el océano Atlántico Norte y el océano Pacífico Norte oriental y central, los huracanes se clasifican de la siguiente forma:

4 Viento máximo de 1 minuto a la altura de observación meteorológica estándar de 10 m sobre una exposición sin obstrucciones.

Tabla 100. Escala Saffir-Simpson

Categoría	Velocidad del viento				Daños potenciales
	m/s	Nudos (kn)	Mph	km/h	
Categoría Cinco	Mayor igual a 70	Mayor igual a 137	Mayor igual a 157	Mayor igual a 252	Se producirán daños catastróficos: se destruirá un alto porcentaje de las casas con estructura, con la falla total del techo y el colapso de las paredes. Los árboles caídos y los postes de electricidad aislarán las áreas residenciales. Los cortes de energía durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte del área quedará inhabitable durante semanas o meses.
Categoría Cuatro	58 - 70	113 - 136	130 - 156	209 - 251	Ocurrirán daños catastróficos: las casas bien construidas pueden sufrir daños severos con la pérdida de la mayor parte de la estructura del techo y/o algunas paredes exteriores. La mayoría de los árboles serán quebrados o arrancados de raíz y los postes de energía derribados. Los árboles caídos y los postes de electricidad aislarán las áreas residenciales. Los cortes de energía durarán semanas o posiblemente meses. La mayor parte del área quedará inhabitable durante semanas o meses.
Categoría Tres	50 - 58	96 - 112	111 - 129	178 - 208	Ocurrirán daños devastadores: las casas bien construidas pueden sufrir daños importantes o la eliminación de la plataforma del techo y los extremos de los hastiales. Muchos árboles se romperán o arrancarán de raíz, bloqueando numerosos caminos. La electricidad y el agua no estarán disponibles durante varios días o semanas después de que pase la tormenta
Categoría Dos	43 - 49	83 - 95	96 - 110	154 - 177	Los vientos extremadamente peligrosos causarán daños extensos: las casas de estructura bien construidas podrían sufrir daños importantes en el techo y el revestimiento. Muchos árboles con raíces poco profundas se romperán o arrancarán de raíz y bloquearán numerosos caminos. Se espera una pérdida de energía casi total con cortes que podrían durar desde varios días hasta semanas.
Categoría Uno	33 - 42	64 - 82	74 - 95	119 - 153	Los vientos muy peligrosos producirán algunos daños: las casas de madera bien construidas podrían tener daños en el techo, las tejas, el revestimiento de vinilo y las canaletas. Las ramas grandes de los árboles se romperán y los árboles con raíces poco profundas pueden caerse. Es probable que los daños extensos a las líneas y postes de energía provoquen cortes de energía que podrían durar de unos pocos a varios días.
Tormenta tropical*	8 - 32	34 - 63	39 - 73	63 - 118	Lluvias abundantes que pueden provocar inundaciones devastadoras. Vientos fuertes que pueden generar tornados.*
Depresión tropical*	Menor igual a 17	Menor igual a 33	Menor igual a 38	Menor igual a 62	Lluvias que pueden llegar a causar graves daños e incluso inundaciones.*

*Nota: Estas clasificaciones no pertenecen a la escala Saffir-Simpson pero son categorías iniciales de un ciclón tropical y se utilizan adicionalmente a la misma.

Fuente: (National Hurricane Center, 2021)

El impacto de los ciclones tropicales y los daños que puedan ocasionar dependen no solo de la velocidad del viento, sino también de factores como la velocidad de desplazamiento, la duración de vientos fuertes, la precipitación acumulada durante y después de que tocan tierra, el cambio repentino de la dirección de desplazamiento y de intensidad, su estructura (por ejemplo, el tamaño y la intensidad), así como la respuesta que el ser humano dé a los desastres causados por estos sistemas.

Aspectos destructivos de los huracanes tropicales

Los efectos destructivos de los ciclones tropicales se deben principalmente a cuatro aspectos: 1) viento, 2) oleaje, 3) marea de tormenta y 4) lluvia. A lo largo de la historia, la marea de tormenta es la causa principal de daños y muertes ocasionadas por ciclones tropicales. Cada uno de estos fenómenos se localizan al interior del ciclón tropical o a su exterior, es decir, el viento y el oleaje están concentrados a pocos kilómetros del centro del huracán, mientras que las lluvias que lo acompañan afectan áreas a cientos de kilómetros de su centro.

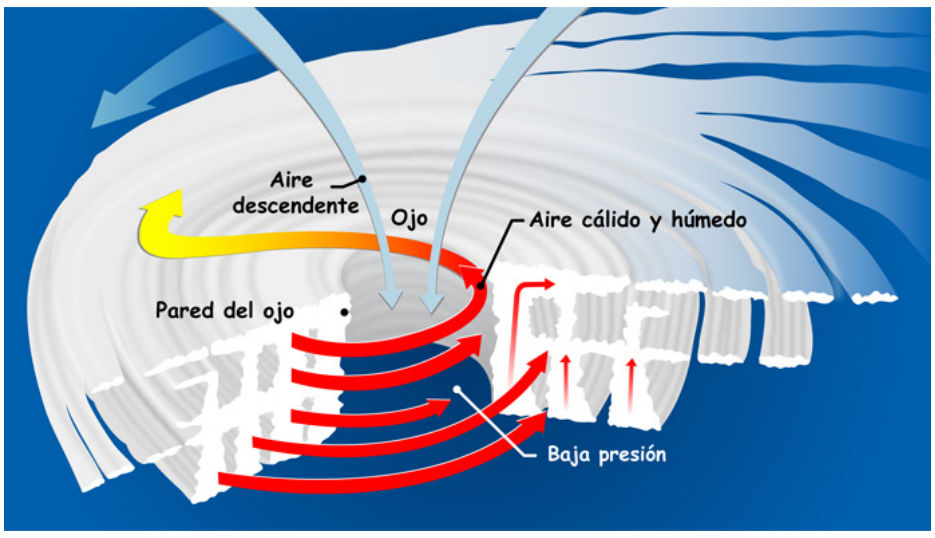
Vientos

Una de las formas más comunes de clasificar la evolución e intensidad del ciclón es, precisamente, la velocidad máxima sostenida de los vientos. Sin embargo, como nos señala Rosengaus (2002), una de las mayores confusiones de las operaciones de protección civil y la población es percibir que el ciclón es arrastrado por los vientos, siendo la realidad totalmente opuesta: los vientos están siendo llevados al sitio por el ciclón. Se debe entonces, considerar el daño que puede generar un ciclón tropical por las condiciones “pico” de los vientos al sitio de interés y el tiempo de arribo de las condiciones de vientos consideradas como peligrosas.

Oleaje

El oleaje se produce cuando el viento pasa por la superficie del agua y la fuerza de fricción ocasiona que se formen ondas. El oleaje sobre la superficie del mar (o lagos, lagunas o cuerpos de agua) no es otra cosa que una ondulación periódica de su superficie (SEGOB/CENAPRED, 2006). La potencia del oleaje está directamente asociada a su altura y la profundidad de la franja costera y de cuánta distancia tenga que recorrer sobre aguas de mediana a poca profundidad. Las olas producidas por un ciclón empiezan a ser afectadas por el fondo de 200 metros y ser determinantes a partir de los 40 m (Rosengaus, 2002). No obstante, los índices de peligrosidad costera se pueden hallar analizando la batimetría (o topografía submarina) alrededor de las costas. Así pues, la distancia entre la costa (o línea batimétrica 0 m) y el límite de la plataforma continental (línea batimétrica 200 m) se convierte en un índice de peligrosidad del oleaje ciclónico en la zona costera.

Figura 164. Anatomía de un huracán



Fuente: Kelvinsong, CC BY 3.0 https://creativecommons.org/licenses/by/3.0, via Wikimedia Commons

Marea de tormenta

Tambien conocida como marejada ciclónica o oleaje ciclónico, es uno de los efectos menos conocido entre la población y aun a nivel técnico en nuestro país, sin embargo es uno de los mas peligrosos. Se define como la sobreelevación del nivel medio del mar (puede ser de más de 1 metro) cuando un ciclón tropical se acerca a la costa (Rosengaus, 2002) y se ocasiona por la combinación de vientos fuertes, baja presión y la rotación terrestre. La amplitud de la marea de tormenta depende de la presión atmosférica y de aspectos físicos como la configuración de la línea de la costa y las profundidades del fondo marino cercano a la costa.

La marea se agrega al oleaje que físicamente se está produciendo en el momento que se aproxima el huracán y por esta razón no es tan obvio percatarse de la existencia de dicha sobreelevación por lo que simplemente se reportan olas que tienen mayores alcances tierra adentro.

La combinación de ambos fenómenos es capaz de destruir instalaciones portuarias, romper obras de defensa, hundir embarcaciones o erosionar las playas. El efecto más visible e inmediato es la inundación de las zonas costeras con agua de mar que, dependiendo de la topografía, puede llegar a cubrir franjas de varios kilómetros y causar graves daños a la infraestructura y propiedades. También puede generar corrientes de resaca extremadamente peligrosas que pueden arrastrar a las personas y embarcaciones hacia el mar.

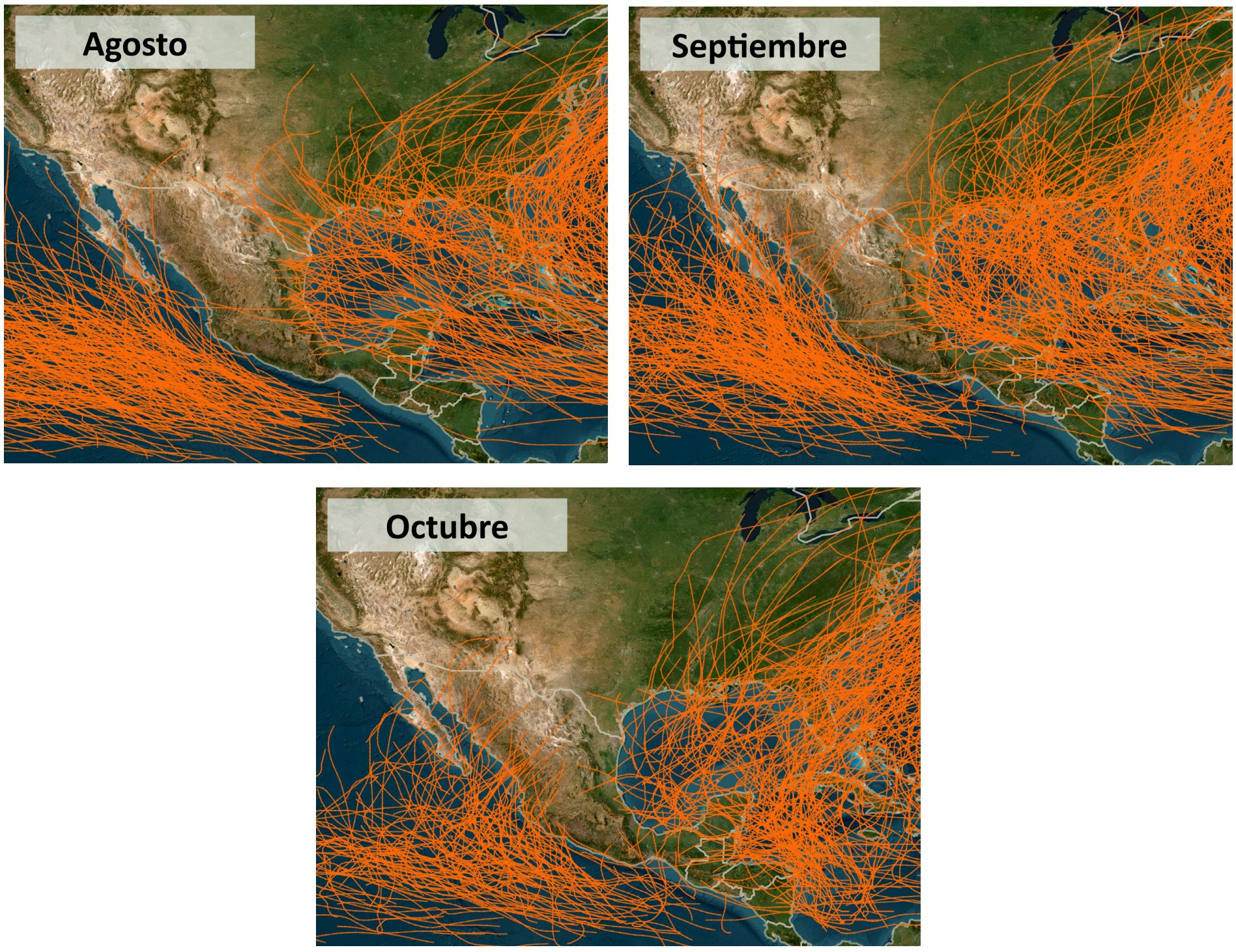
Lluvia e inundaciones

Las lluvias torrenciales que acompañan a los ciclones tropicales pueden provocar inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra, que pueden causar daños significativos en la infraestructura y propiedades, así como poner en peligro la vida de las personas. Este es tal vez el efecto más conocido para los pobladores debido a su magnitud. Los huracanes arrastran consigo enormes cantidades de humedad que, al precipitarse, generalmente con mayor intensidad cuando el ciclón encuentra una barrera montañosa, provocan fuertes tormentas y deslizamientos de tierra.

5.3.5.1. Metodología

México se encuentra localizado entre las regiones ciclogenéticas[5] del Atlántico Norte y el Pacífico Nororiental, por lo que es altamente vulnerable a la incidencia de este tipo de fenómenos hidrometeorológicos. En el país, la temporada en que se presentan estos fenómenos inicia oficialmente el 15 de mayo (Pacífico) ó 1° de junio (Atlántico) y termina el 30 de noviembre de cada año, siendo los meses de Agosto, Septiembre y Octubre cuando se registran más eventos ciclónicos.

Figura 165. Cantidad de ciclones por mes y de tipo por año



Fuente: Elaboración propia a parti de las trayectorias del IBSTraCS

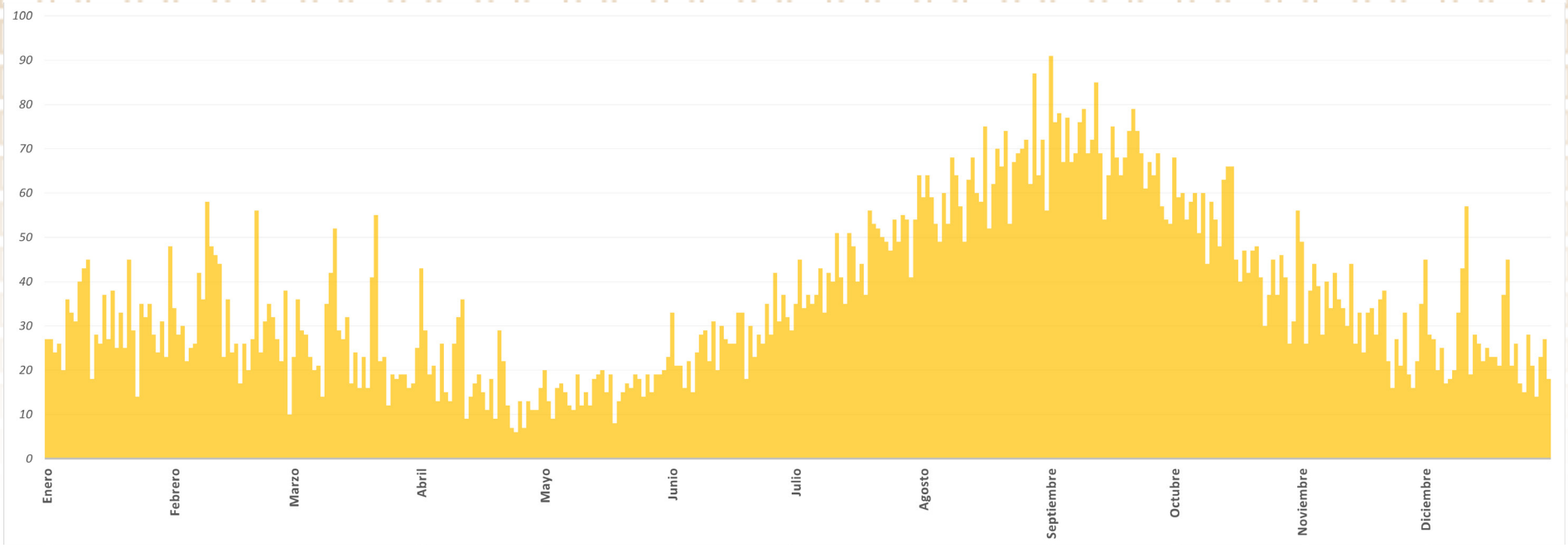
La fecha de inicio de la temporada de huracanes es establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México a través del Servicio Meteorológico Nacional, que es el encargado de monitorear y pronosticar el clima y los fenómenos meteorológicos en el país. Es importante tener en cuenta que los ciclones tropicales pueden formarse en cualquier momento del año.

Para tener un panorama general de la presencia de los ciclones tropicales este Atlas presenta una breve descripción del fenómeno tomando como base los datos del proyecto International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS), que es una colección mundial de ciclones tropicales creada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) del gobierno de E.U.A. en colaboración con todos los Centros Meteorológicos Regionales Especializados de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), así como con otras organizaciones e individuos de todo el mundo (Knapp et al., 2018).

Un análisis de estos datos de huracanes, desde el año 1842, se muestra que el 42 % de estos se presenta en los meses de agosto, septiembre y octubre.

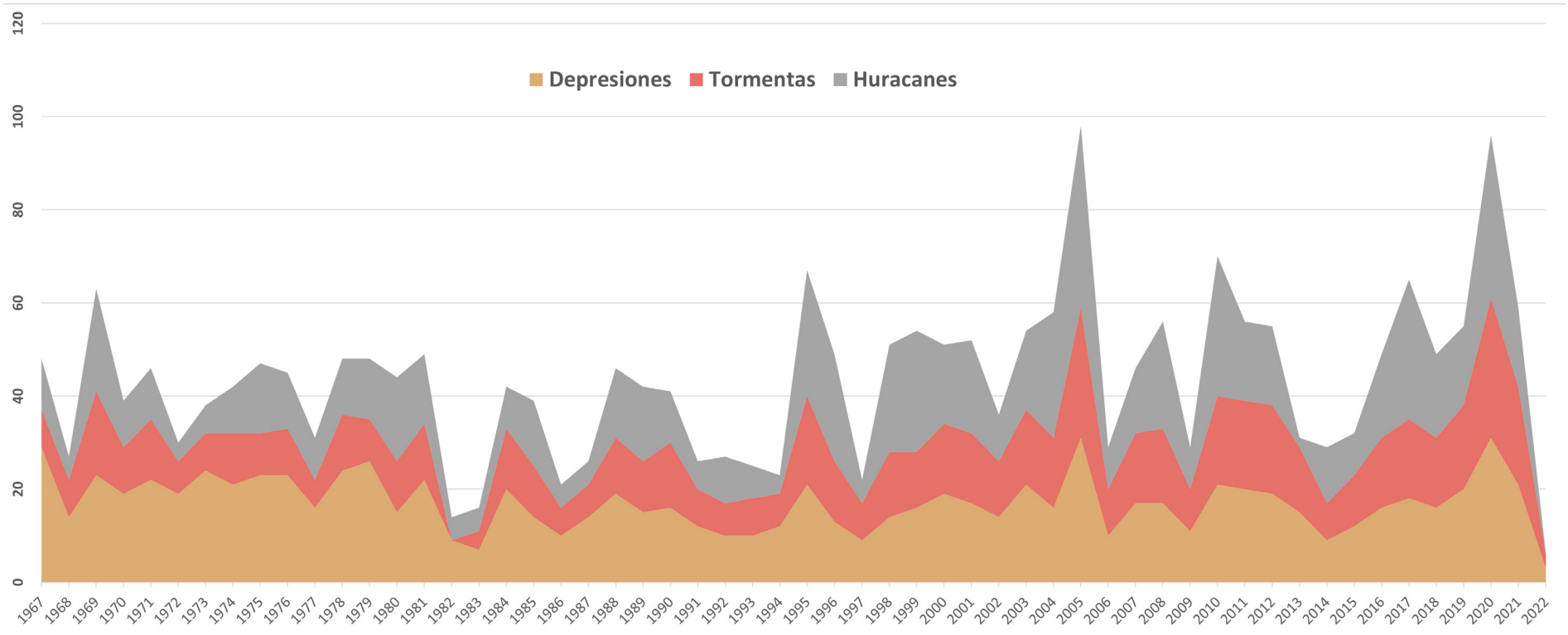
5 Zonas donde históricamente se producen los ciclones tropicales

Figura 166. Gráfica de ciclones por mes del año de IBSTracks



Fuente: Elaboración propia a partir de las trayectorias del IBSTraCS

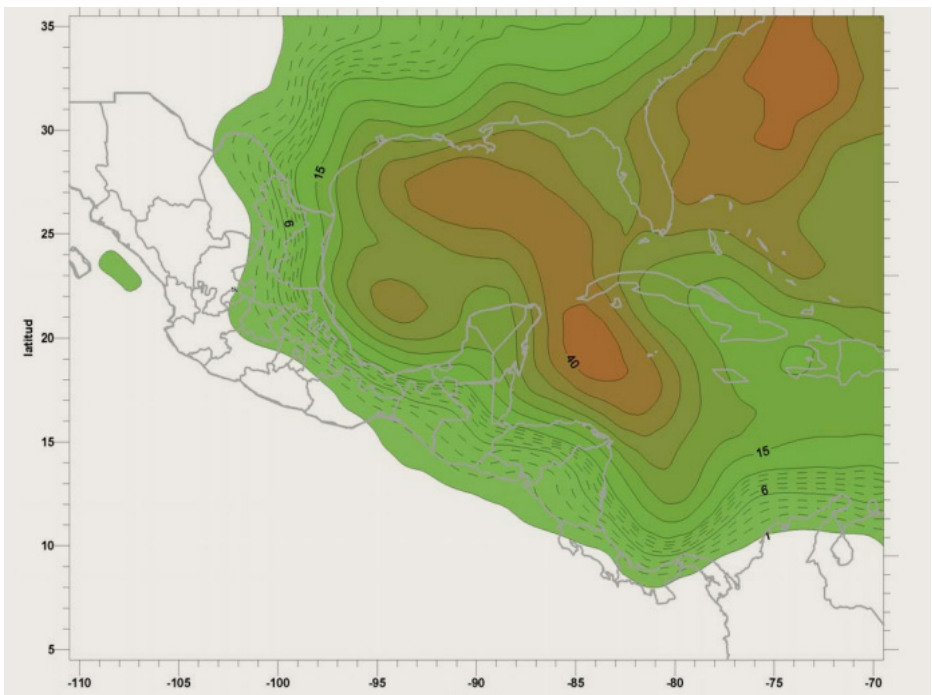
Figura 167. Distribución historica por mes y tipo de fenomenos



Fuente: Elaboración propia a partir de las trayectorias del IBSTraCS

De igual manera el Atlas climatológico de ciclones tropicales en México (Rosengaus Moshinsky et al., 2002) nos presenta un mapa de isolíneas[6] para los ciclones tropicales en el Atlántico que muestra un corredor con una importante presencia de ciclones tropicales entre la Península de Yucatán y Cuba hasta llegar a las costas de Louisiana y Texas, en los E. U. A. Se observa una acumulación de ciclones tropicales frente a Veracruz mientras que la isolínea de 20 ciclones tropicales es paralela a la costa del Golfo de México y atraviesa Campeche para salir al sur de Quintana Roo, es decir, la Península de Yucatán está expuesta a más de 20 ciclones tropicales en 150 años.

Figura 168. Isolíneas de presencia histórica de ciclones tropicales (1851 - 2000)



Fuente: Atlas climatológico de ciclones tropicales de México

6 Es una curva que conecta los puntos en que la función tiene un mismo valor constante.

Memoria histórica

Para el municipio de Tulum los ciclones tropicales más significativos, por los daños causados, se han presentado en el periodo de 1951 a 2022 (70 años), de acuerdo con la información recabada por la NOOA (National Oceanic and Atmospheric Administration) han sido 12 Depresiones Tropicales (DT), 27 Tormentas Tropicales (TT), 8 Huracanes categoría 1 (H1), 1 Huracán categoría 2 (H2), 6 Huracanes categoría 3 (H3), 3 Huracanes categoría 4 (H4) y 1 Huracán categoría 5 (H5), de acuerdo a sus viento máximos sostenidos.

Tabla 101. Número de ciclones tropicales con afectación al municipio.

Categoria	Cantidad
Depresiones Tropicales (DT),	12
Tormentas Tropicales (TT)	27
Huracanes categoría 1 (H1)	8
Huracanes categoría 2 (H2)	1
Huracanes categoría 3 (H3)	6
Huracanes categoría 4 (H4)	3
Huracanes categoría 5 (H5)	1

Fuente: Elaboración propia a partir de las trayectorias del IBSTraCS

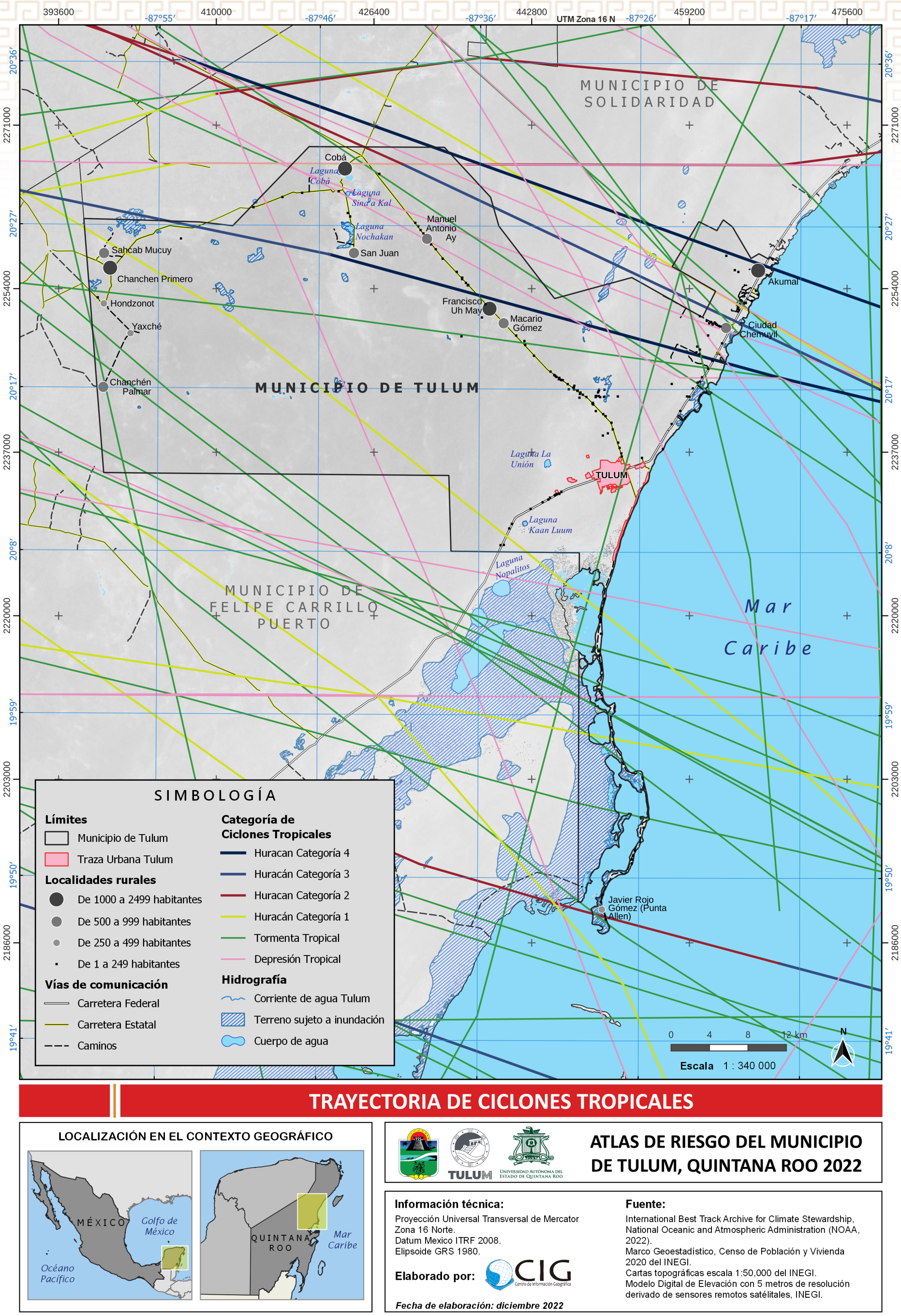
Como se puede observar en la tabla anterior, han sido más tormentas tropicales (TT) y depresiones tropicales (DT) los que han afectado el territorio del municipio. Los datos especificados por la NOAA apuntan que el 22 de septiembre de 1933 se desplazó sobre el territorio municipal un huracán categoría 4, sin nombre propuesto – localizado en el mapa 1 al noroeste del municipio –.

La temporada 2005 fue considerada como la más activa en la historia desde que se llevan registros, ese año en el municipio de Tulum se sintieron los efectos de 3 fenómenos (Cindy, Emily y Stan). Los huracanes de mayor categoría que han atravesado el municipio han sido Charlie (1951, Cat. 4), Hilda (1955, Cat. 3), Beulah (1967, Cat. 3), Gilberto (1988, Cat. 5), Roxanne (1995, Cat. 3), Emily (2005, Cat. 4) y Grace(2021), de acuerdo con la Escala Saffir- Simpson (tabla 101).

5.3.5.2. Memoria de cálculo

Se cuenta con una recopilación de mapas con datos de los ciclones tropicales desde el año 1951 hasta el año 2022. En la figura 169 se puede observar las trayectorias de los ciclones tropicales.

Figura 169. Trayectorias de los ciclones tropicales por el municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia a partir de las trayectorias del IBSTraCS

Los huracanes son fenómenos con una expresión territorial extensa, por lo que el análisis del riesgo que presentan debe ser de tipo regional. El diámetro de un Huracán puede llegar a ser muy variado incluso cuando se trate del mismo fenómeno.

Con el objetivo de estimar el peligro que representan los ciclones tropicales (huracanes) para el municipio de Tulum, se desarrolló un enfoque basado en la creación de una cuadrícula que consta de celdas hexagonales de 200 metros de apotema[7] (figura 170), que de acuerdo con Elsner (2012) es la figura geométrica que representa mejor los valores climáticos de los huracanes hay tener 6 lados vecinos de igual longitud.

Se tomó como referencia el registro histórico de presencia de huracanes de IBTrACS (Knapp et al., 2018), en el Océano Pacífico y Océano Atlántico que tiene un registro de este tipo de fenómenos ocurridos desde 1851 a 2022 de múltiples Centros Meteorológicos Regionales Especializados de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Esta base de datos contiene información respecto a la fecha, presión atmosférica y velocidad de traslación de los fenómenos registrados.

Figura 170. Malla de análisis generada



Fuente: Elaboración propia

A partir de la cuadrícula señalada, se analizaron las trayectorias históricas de los huracanes y se determinó el radio de vientos máximos sostenidos utilizando la siguiente fórmula propuesta por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en 2006:

$$R_{max} = 0.007e^{0.01156P_0}$$

Donde e es la base del logaritmo natural (2.71828) y Po es la presión central registrada. En función del radio de vientos máximos sostenidos se estimó adecuado considerar un radio de 160 km a partir de los límites municipales para analizar la afectación de estos. Para el municipio de Tulum se obtuvo un total de 58 fenómenos; todos fueron utilizados en el cálculo del IPCT, en la figura 169 se muestran las trayectorias y en la tabla 96 se listan estos fenómenos.

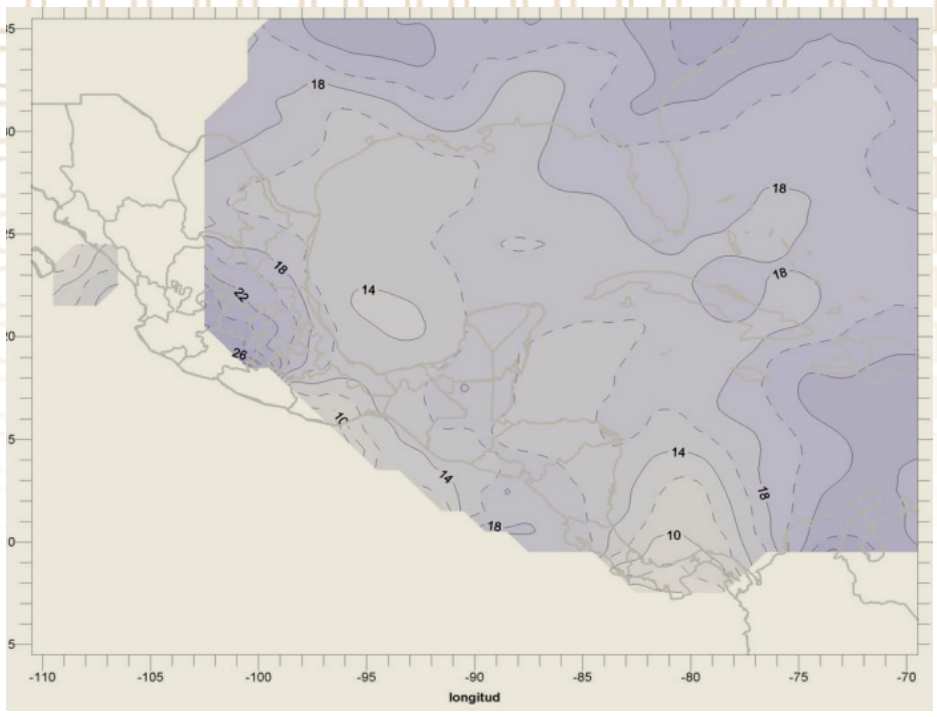
Adicionalmente se estimo la velocidad máxima de los vientos sostenidos partiendo de la fórmula (CENAPRED, 2006):

$$V_{max} = 20.1834(1013 - P_0)^{0.5} - 0.2618sen\theta + 0.5V_d$$

Donde P_o es la presión central registrada y Vd es la velocidad de desplazamiento del ciclón tropical (en km/hr) y es la latitud del centro del ciclón en grados. La velocidad de desplazamiento se obtuvo del mapa de velocidades máximas de traslación de los ciclones tropicales en el Atlántico (figura 171) (Rosengaus Moshinsky et al., 2002).

7 En una figura bidimensional de un polígono regular es la menor distancia entre el centro y cualquiera de sus lados.

Figura 171. Velocidad de traslación para los ciclones tropicales del Atlántico



Fuente: Atlas climatológico de ciclones tropicales de México

En la figura anterior se observa la media de la velocidad de traslación de los ciclones tropicales en el océano Atlántico para un periodo de 150 años (1851 al 2000), se encuentra representada por isolíneas sin que exista un contraste marcado en cuanto a su distribución geográfica. Puede observarse que los ciclones tropicales aceleran su velocidad de traslación cuando tocan tierra. La media de la velocidad de traslación de los ciclones tropicales en la península de Yucatán es constante. En México, la media de la velocidad de traslación en el Atlántico es de los 16 km/h. El conocimiento de los valores de la velocidad de traslación de los ciclones tropicales permite a las autoridades de Protección Civil hacer una estimación del tiempo de llegada, en caso de que éste se dirija a la costa.

Para el cálculo del Índice de Peligro por Ciclones Tropicales se estimaron las tasas de excedencia de todas las trayectorias dentro del área de la malla (figura 170) y para cada una de las celdas que la conforman, es decir que cada celda contiene la cuenta de cuantos fenómenos la atraviesan por tipo - de acuerdo a la escala Saffir-Simpson - donde Mi es el número de eventos de intensidad i máxima alcanzada por un evento.

Tabla 102. Ejemplo para la estimación de las tasas de excedencia

Intensidad i	Categoría	Mi
1	Depresión tropical	Es el número de eventos de intensidad i máxima alcanzada, para cada categoría.
2	Tormenta tropical	
3	Huracán categoría 1	
4	Huracán categoría 2	
5	Huracán categoría 3	
6	Huracán categoría 4	

A partir de la tabla 102 se calculó la tasa de excedencia de intensidad υ(i), registrando todos los niveles de intensidad *i* excedidos durante un evento, es decir, se registran los niveles de intensidad iguales o menores rebasados durante el mismo evento. Por ejemplo, si se tiene un evento de huracán categoría 4 de intensidad 6 (H4, Mi) se registra también la ocurrencia del mismo evento para las intensidades inferiores.

$$u_i = \sum_{j=0}^{N} M_{nj}$$

$$u_1 = \sum_{j=0}^{6} M_{6-j} = M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 + M_1$$

$$u_2 = \sum_{j=0}^{5} M_{6-j} = M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2$$

$$u_3 = \sum_{j=0}^{4} M_{6-j} = M_6 + M_5 + M_4 + M_3$$

$$u_4 = \sum_{j=0}^{3} M_{6-j} = M_6 + M_5 + M_4$$

$$u_5 = \sum_{j=0}^{2} M_{6-j} = M_6 + M_5$$

$$u_6 = \sum_{j=0}^{1} M_{6-j} = M_6$$

Estas tasas de excedencia permiten la estimación de los periodos de retorno (*Tri*) para cada una de las categorias de fenómenos que hayan ocurrido en el área de estudio. La formula para la estimación del periodo de retorno (en años) es la siguiente:

$$Tri = \frac{1}{u_{(i)}}$$

Por otra parte, el índice también puede estar basado en la suma de la tasas de excedencia anual por la intensidad cada tipo de ciclón tropical. De acuerdo con esto, una vez calculada la tasa de excedencia anual se calculó el índice de peligro por presencia de ciclones tropicales (IPCT) con base en las tasas de excedencia, multiplicadas por la intensidad correspondiente (p. ej. 1 para Depresiones tropicales, 2 para Tormentas tropicales, 3 para Huracán categoría 1 y así hasta la categoría 5 de Huracán).

$$IPCT = \sum_{i=1}^{6} u_i * i$$

5.3.5.3. Resultado del análisis

La región de Quintana Roo es altamente vulnerable a los ciclones tropicales debido a su ubicación geográfica y su perfil costero. El aumento en la frecuencia y la intensidad de los ciclones tropicales en la región en las últimas décadas es evidente, y es importante tomar medidas para reducir el riesgo de daños materiales y humanos en la región. Las medidas de mitigación y adaptación, como la construcción de infraestructura de protección y la promoción de la concientización de los riesgos asociados a los ciclones tropicales, son esenciales para reducir la vulnerabilidad de la población y la infraestructura costera en la región.

Los resultados de este análisis indican que el municipio de Tulum es altamente vulnerable a los ciclones tropicales debido a su ubicación geográfica y su perfil costero. Los ciclones tropicales que afectan la región tienden a tener una intensidad significativa, y su trayectoria puede cambiar rápidamente, lo que dificulta la predicción de su impacto en la región. Los datos históricos también muestran un aumento en la frecuencia y la intensidad de los ciclones tropicales en la región en las últimas décadas.

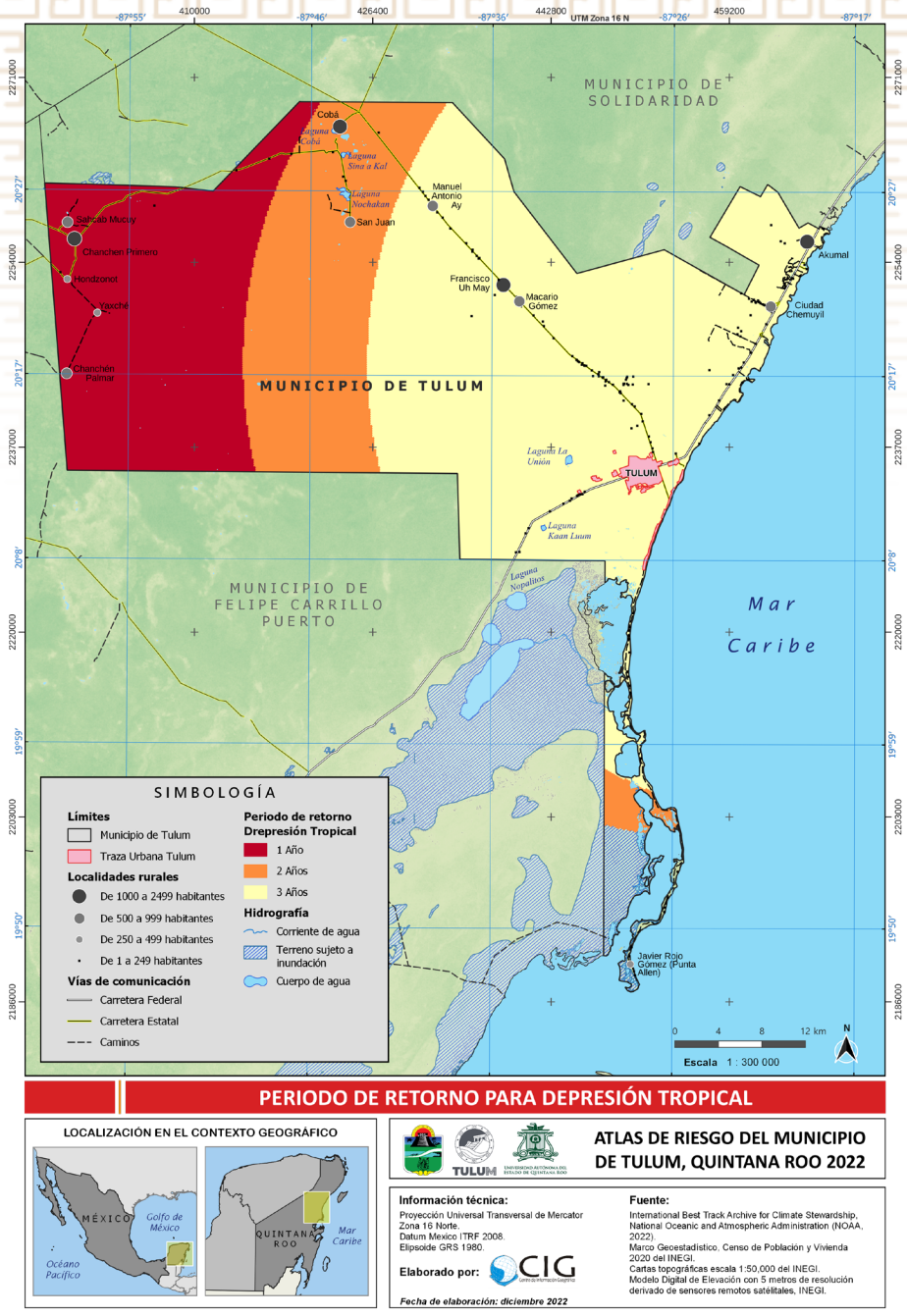
De acuerdo con los periodos de retorno calculados, la zona sureste del municipio (donde se encuentra la ciudad de Tulum) cada año se presenta al menos un fenómeno de categoría Depresión tropical, siendo que el noroeste del municipio tiene un periodo de retorno de año y medio. Este resultado es un tanto lógico ya que los ciclones tropicales pierden velocidad al adentrarse en el territorio, sin embargo podemos ver en la figura 172 que el sur del municipio, en particular la localidad de Punta Allen también tiene un periodo de retorno grande en la escala presentada, es decir, de año y medio.

En relación con el fenómeno de mayor categoría analizado (Huracán categoría 4) se puede observar en la figura 177 que la porción oriental del municipio (donde se encuentra la localidad de Tulum) tiene un periodo de retorno de alrededor de 19 años. Es importante precisar que no fue posible calcular el IPCT para huracanes categoría 5 ya que la base de datos de trayectorias IBTrACS (Knapp et al., 2018) no contiene información de ciclones tropicales en la zona de estudio.

El Índice de Peligro por Ciclones Tropicales (IPCT) establece un peligro **Muy alto** para la ciudad de Tulum y sus alrededores, al norte hasta Caleta Tankah y al oeste hasta la localidad de Francisco Uh May. El nivel de peligro va decreciendo conforme se está más lejos de la costa hasta ser **Muy bajo** para localidades como Cobá o Chanchen I (figura 178).

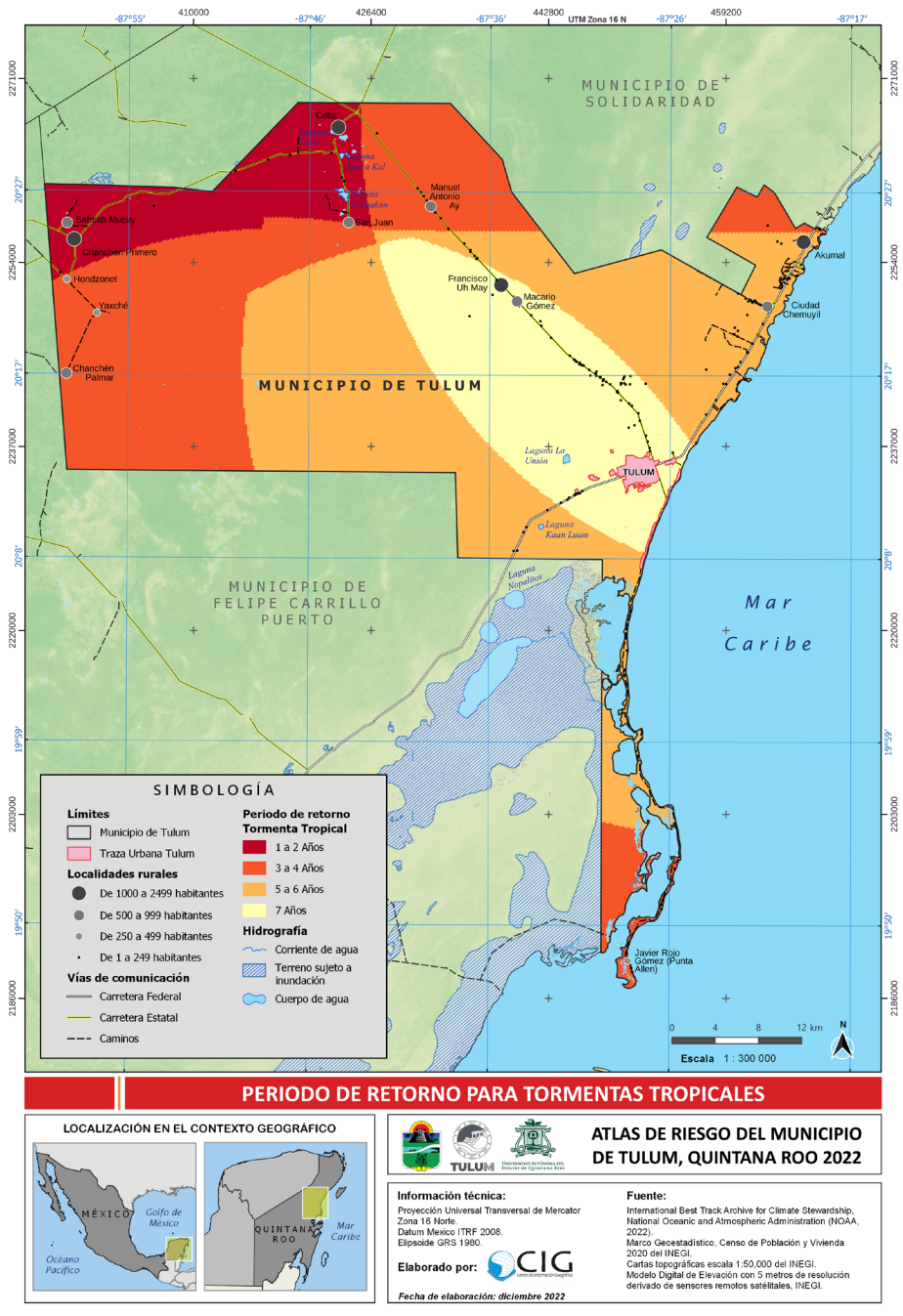
5.3.5.4. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados

Figura 172. Periodo de retorno para Depresiones tropicales (en años)



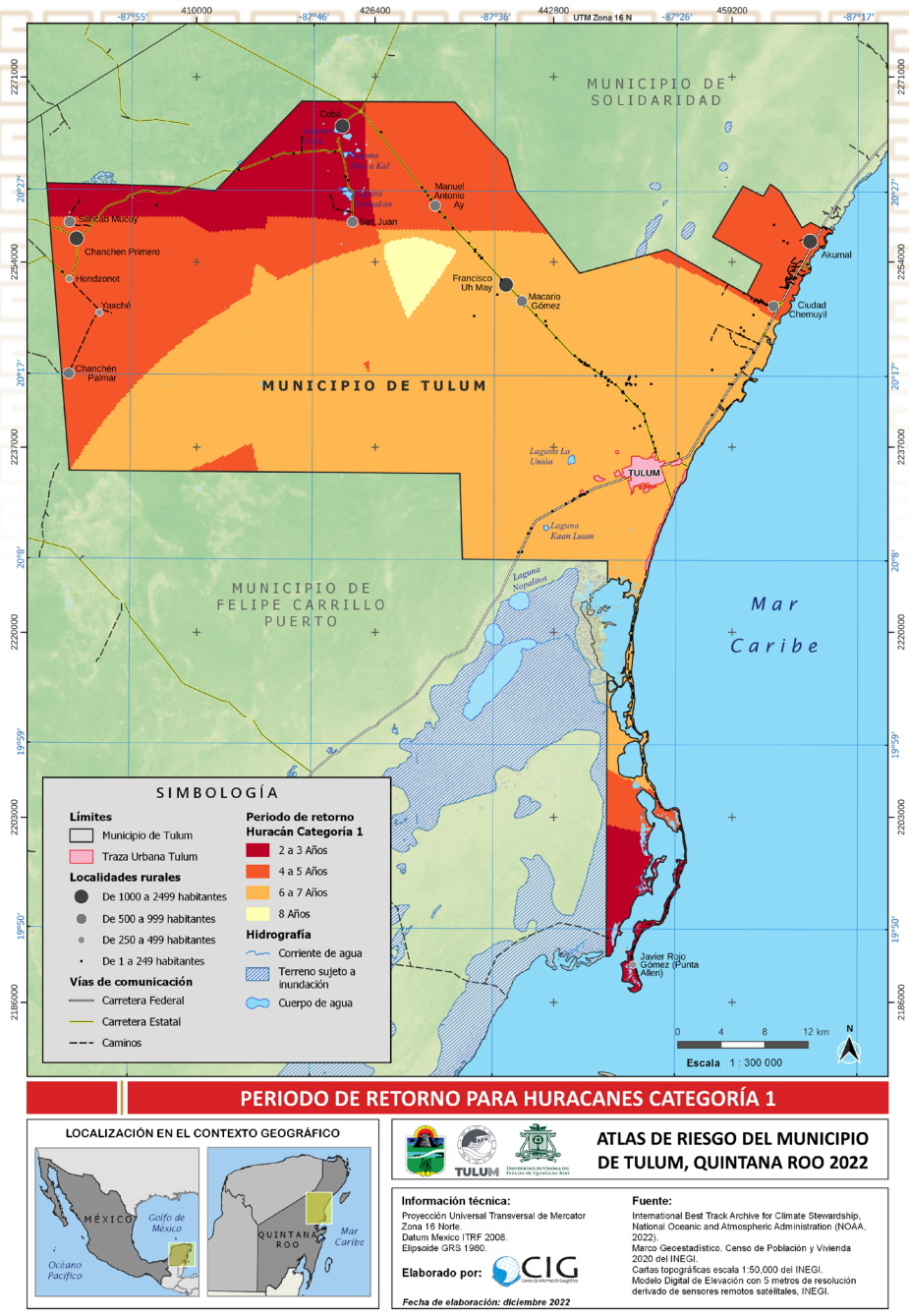
Fuente: Elaboración propia

Figura 173. Periodo de retorno para Tormentas tropicales (en años)



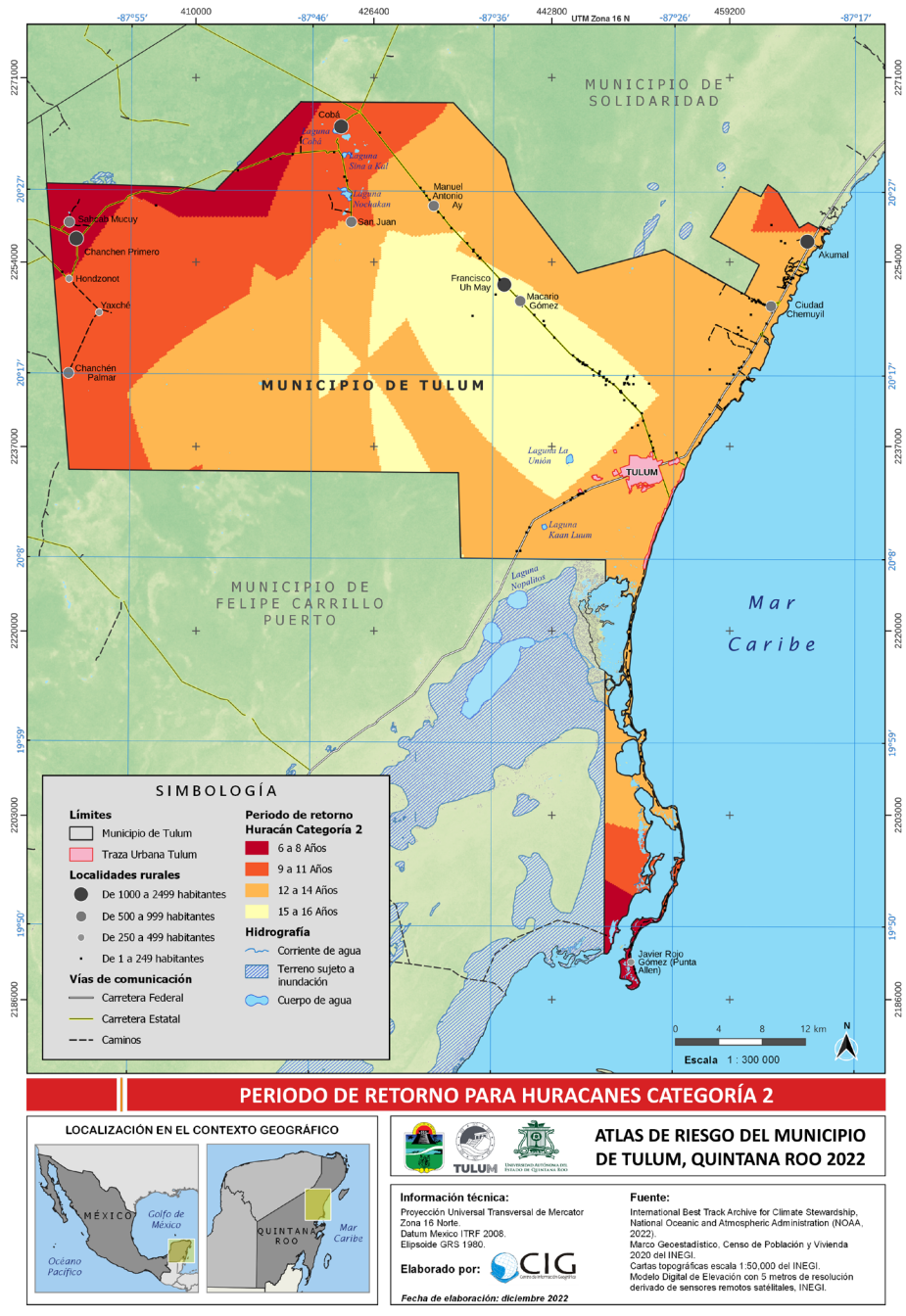
Fuente: Elaboración propia

Figura 174. Periodo de retorno para Huracán categoria 1 (en años)



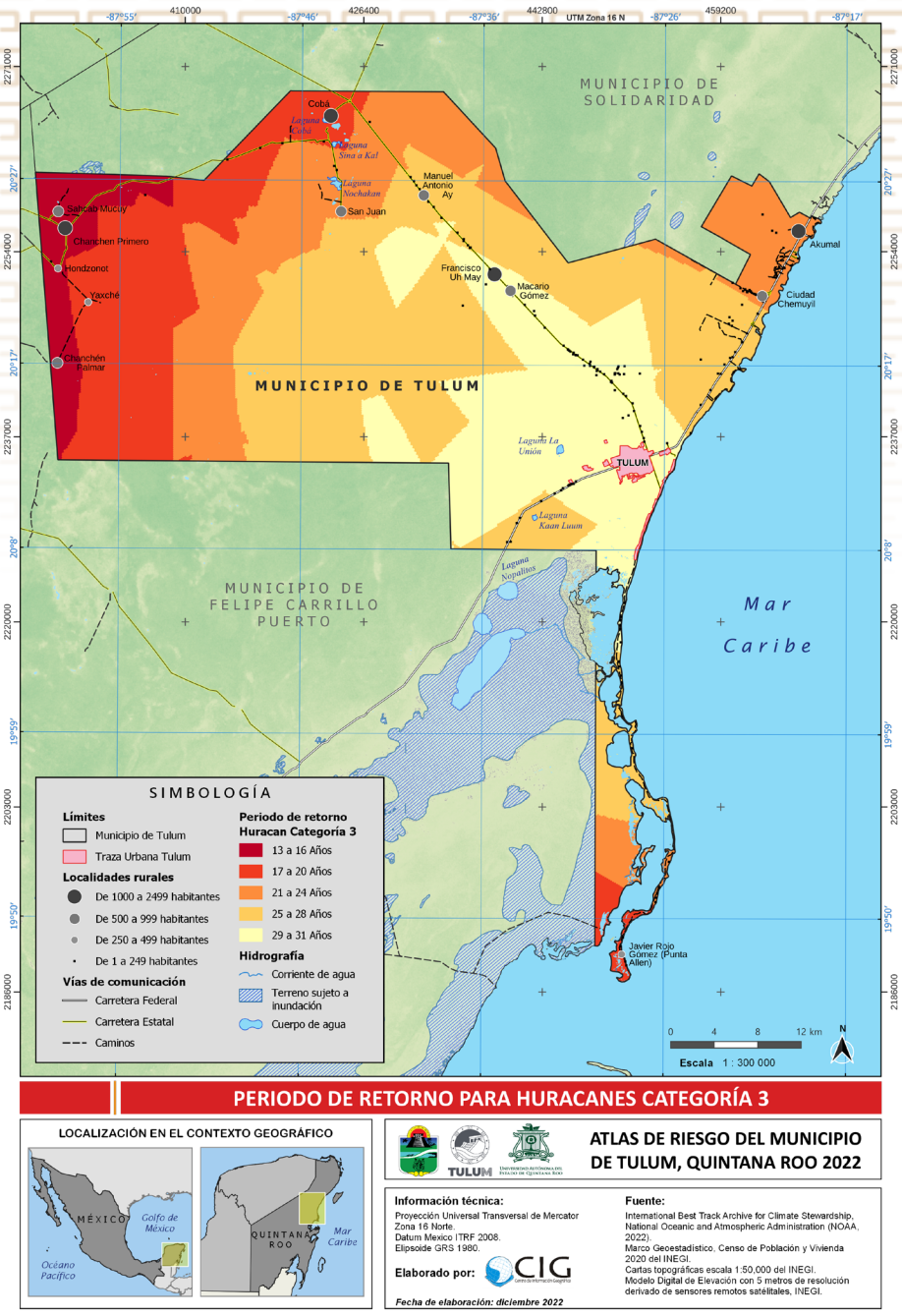
Fuente: Elaboración propia

Figura 175. Periodo de retorno para Huracán categoria 2 (en años)



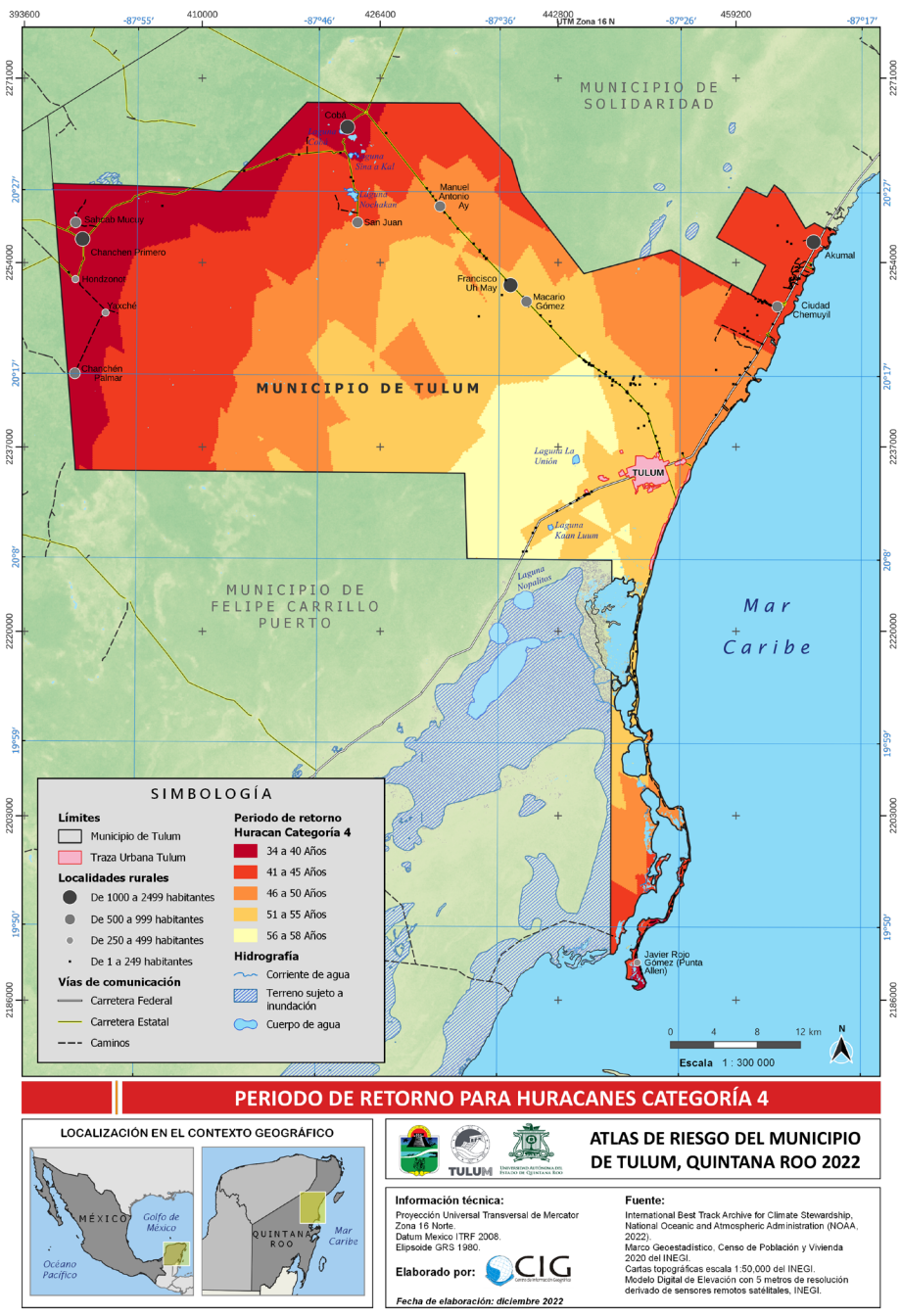
Fuente: Elaboración propia

Figura 176. Periodo de retorno para Huracán categoria 3(en años)



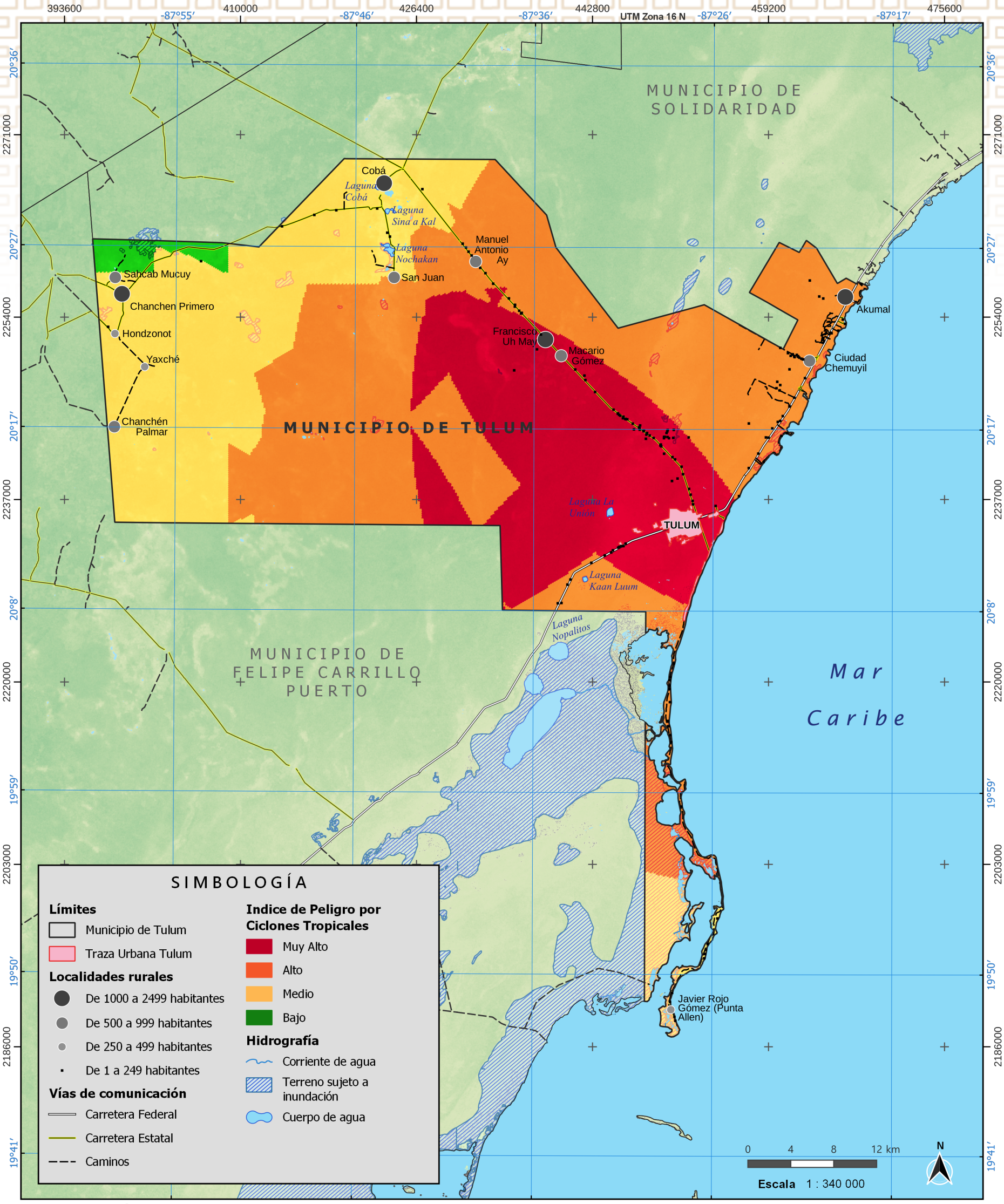
Fuente: Elaboración propia

Figura 177. Periodo de retorno para Huracán categoria 4(en años)

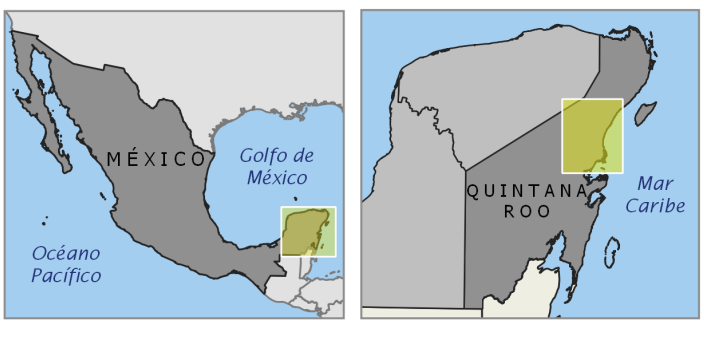


Fuente: Elaboración propia

Figura 178. Indice de Peligro por Ciclones Tropicales (IPCT)



ÍNDICE DE PELIGRO POR CICLONES TROPICALES (IPCT)



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

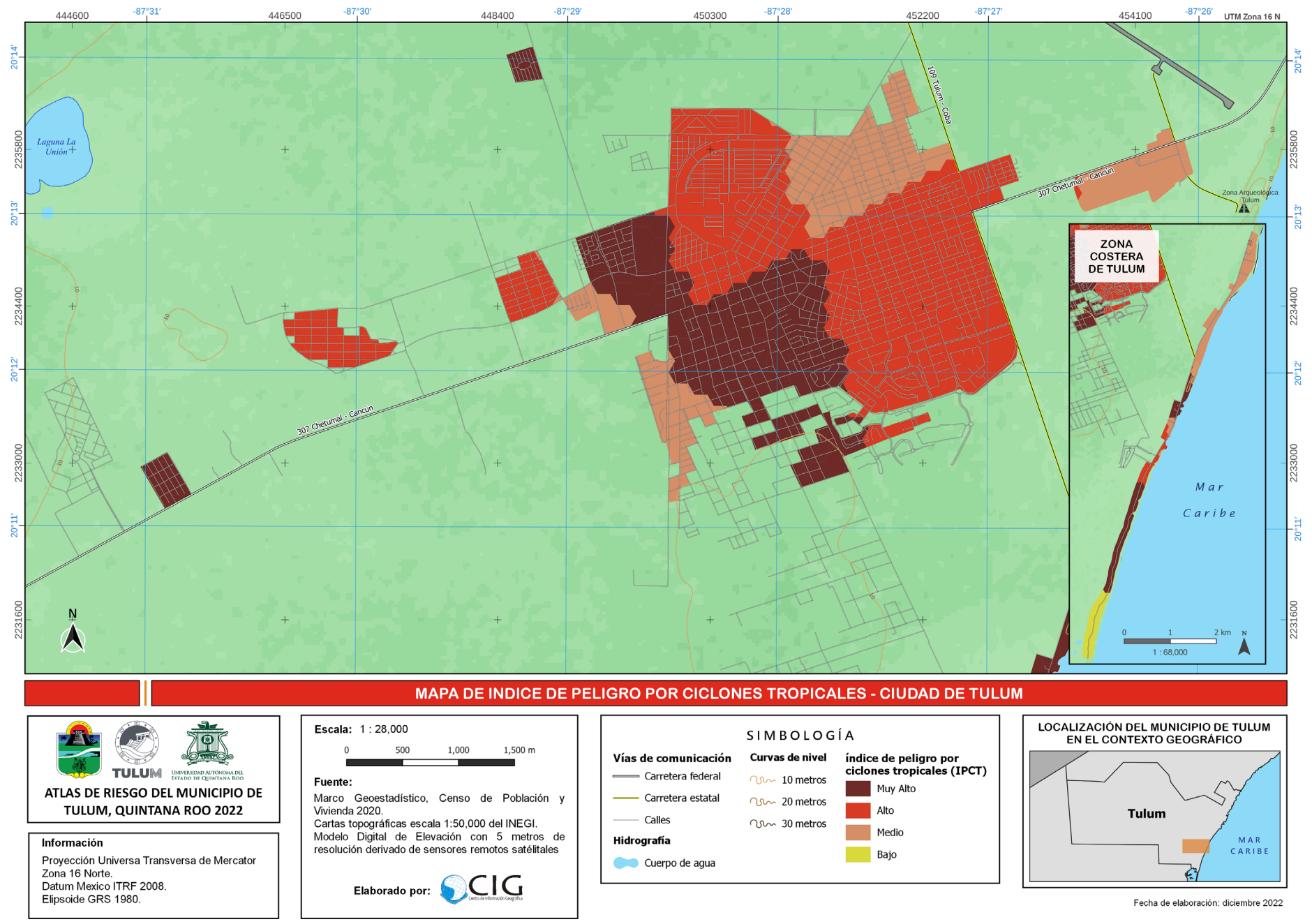
Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:
International Best Track Archive for Climate Stewardship, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2022).
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 5 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Figura 179. Índice de Peligro por Ciclones Tropicales (IPCT)



Fuente: Elaboración propia.

5.3.6. Tormentas eléctricas

De acuerdo con la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz y CENAPRED (2021), en México, desde 1985 se registran muertes por caída de rayos. En los últimos 22 años, se han informado 4,848 muertes en 31 estados de todo el país, y un promedio de 220 muertes por año, incidentes que se registraron de mayo a octubre, más a menudo por la tarde o por la noche (Secretaría de Protección Civil, 2022). El único estado que no ha registrado muertes es Baja California Sur, mientras que en el Estado de México se localiza el mayor número de casos.

Asimismo, el desarrollo económico y poblacional de las ciudades hace posible que ocurran con mayor frecuencia efectos negativos generados por tormentas eléctricas (García, et al., 2007, cit. CENAPRED, 2021), por lo que es necesario implementar las medidas necesarias que minimicen sus efectos.

Los rayos son el aspecto más peligroso de una tormenta (figura 180). Si bien los rayos tienen solo un diámetro de 2 a 3 centímetros, pueden viajar kilómetros. No obstante, que la mayoría de los rayos tienen una longitud de 2 a 4.8 km, se observó que el rayo récord mundial cubrió 768 km en tres estados de los Estados Unidos son Mississippi, Louisiana y Texas en 2020 (Zavisa & Shields, 2022).

El rayo es una descarga electrostática que resulta de la acumulación de cargas positivas y negativas dentro de una nube de tormenta. Cuando las cargas adquieren la fuerza suficiente, aparecen los rayos, cuya manifestación visible es el relámpago, es decir, un destello de luz que se produce dentro de las nubes o entre éstas y el suelo. La mayor cantidad de relámpagos ocurren dentro de la nube, mientras que el 20% se presenta entre la nube y el suelo.

Figura 180. Rayos



Fuente: pixlab

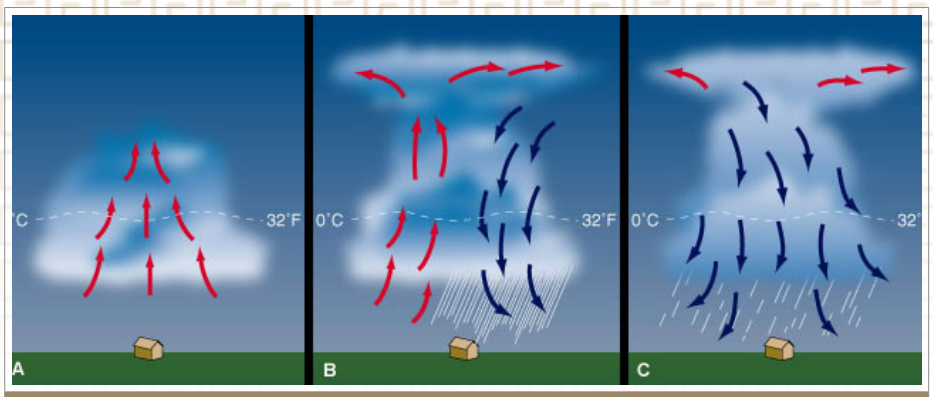
Las tormentas eléctricas son descargas bruscas de electricidad atmosférica que se manifiestan por un resplandor breve (rayo) y por un ruido seco o estruendo (trueno). Las tormentas se asocian a nubes convectivas (cumulunimbus) y pueden estar acompañadas de precipitación en forma de chubascos; pero en ocasiones puede ser nieve, nieve granulada, hielo granulado o granizo (OMM, 1993). Son de carácter local y se reducen casi siempre a sólo unas decenas de kilómetros cuadrados.

Formación de las tormentas eléctricas

De acuerdo a CENAPRED (2021), una tormenta eléctrica se forma por una combinación de humedad, entre el aire caliente que sube con rapidez y una fuerza capaz de levantar a éste, como un frente frío, una brisa marina o una montaña. Todas las tormentas eléctricas contienen rayos, los cuales pueden ocurrir individualmente en grupos o en líneas.

La mayoría de las tormentas eléctricas se forman por un ciclo de tres etapas: 1) Etapa cumulus, 2) Etapa madura y 3) Etapa de disipación (figura 181).

Figura 181. Etapas de formación de tormentas eléctricas



Etapa cumulus	Etapa Madura	Etapa de Disipación
El sol calienta la superficie de la Tierra durante el día. El calor de la superficie calienta el aire cercano. Como el aire caliente es más ligero que aire fresco, comienza a elevarse (conocido como corriente ascendente). Si el aire es húmedo, entonces el aire caliente se condensa en una nube cumulus. La nube continuará creciendo mientras haya aire cálido ascendiendo.	Cuando una nube cúmulo se vuelve muy grande, el agua que contiene se vuelve muy pesada. Cuando el aire ascendente ya no puede soportar las gotas de lluvia, las gotas de lluvia comienzan a caer debajo de las nubes. Mientras tanto, el aire frío comienza a entrar en las nubes. Debido a que el aire frío es más pesado que el aire caliente, comienza a descender en las nubes (llamada corriente descendente). Las corrientes descendentes arrastran agua pesada hacia abajo y hacen que llueva.	Después de unos 30 minutos, la tormenta comienza a disiparse. Esto sucede cuando la corriente descendente comienza a dominar a la ascendente. Ya no se forman gotas de lluvia porque el aire caliente ya no puede ascender. La tormenta amaina con una lluvia ligera mientras las nubes desaparecen de abajo hacia arriba.

Fuente: Ventanas del Universo (s.f.) https://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/tstorm/tstorm_formation.html&lang=sp

El ciclo de duración de una tormenta es de sólo una o dos horas y empieza cuando una porción de aire está más caliente que el de su entorno, o bien, cuando el aire más frío penetra por debajo de ella. No obstante, el proceso completo demora cerca de una hora para tormentas ordinarias. Tormentas superceldas son mucho mayores y más poderosas, y duran varias horas. El estado de madurez de una tormenta está asociado con grandes cantidades de precipitación y rayos.

Por su parte, los rayos se forman a partir de una poderosa carga que se acumula dentro del revuelto interior de la nube tormentosa.

Es imposible explicar exactamente cómo sucede esto, pero se sabe que se forma una carga positiva en la parte superior de la nube y una carga negativa se concentra en la parte inferior. Esta carga negativa es atraída hacia la tierra y la tierra se carga positivamente (figura 182).

Dado que el aire es un buen aislante, evita que la corriente intente igualar las dos cargas durante un tiempo. Finalmente, cuando se acumula suficiente voltaje, los rayos ocurren en dos etapas (Selecciones, 2018):

1. Primero, hay una serie de débiles descargas “guía” que descienden en zig-zag desde la nube. Al mismo tiempo, surge una corriente eléctrica de la tierra, estableciéndose contacto eléctrico entre el cielo y la tierra al encontrarse con la corriente anterior.

2. Potentes corrientes ascienden por este camino y alcanzan las nubes. Es esta segunda parte se observa una “descarga reflejada” la que provoca el relámpago.

CENAPRED (2021) define al rayo como una descarga provocada por la electricidad estática con acumulación de cargas positivas y negativas. Cuando una nube está cargada aparece un rayo de suficiente intensidad, cuyos signos son los relámpagos que se pueden ver con el ojo. Es decir, una luz intermitente que ocurre dentro de una nube o entre una nube y el suelo. La mayoría de los rayos ocurren dentro de las nubes. Solo un 20% ocurre entre las nubes y la tierra.

Los rayos pueden alcanzar rápidamente temperaturas de 30,000 grados centígrados. El aire caliente lo expande rápidamente, creando una onda de choque que se presenta en forma de un sonido llamado trueno el cual viaja en todas direcciones desde un relámpago (CENAPRED, 2021).

Los rayos pueden ser de los siguientes tipos:

a). Nube-aire. La electricidad se desplaza desde la nube hacia una masa de aire de carga opuesta.

b). Nube-nube. El rayo puede producirse dentro de una nube con zonas cargadas de signo contrario.

c). Nube-tierra. Las cargas negativas de las nubes son atraídas por las cargas positivas del suelo.

Figura 182. Formación de un rayo



Fuente: Selecciones (2018) https://selecciones.com.mx/como-se-produce-una-tormenta/

5.3.6.1. Metodología

Para el cálculo del peligro por tormentas eléctricas para el municipio de Tulum, se trabajaron con los datos procesados por UNIATMOS (Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2011).

Las bases de datos se generaron a partir de la información proporcionada por World Wide Lightning Location Network (WWLLN) y de procesos desarrollados por Kucieńska et al. 2010, reportados en su trabajo: Cloud-to-ground lightning over Mexico and adjacent oceanic regions: a preliminary climatology using the WWLLN dataset.

La red WWLL actual incluye 40 estaciones que cubren gran parte del mundo y detectan radiación de muy baja frecuencia ("esféricas") asociadas con rayos. La distribución espacial de los rayos promedio anuales sobre la región continental de México, de acuerdo con Kucieńska et al. 2010, muestra la influencia del forzamiento orográfico en la producción de nubes convectivas con alta actividad de rayos. Sin embargo, también se observa un número muy alto de rayos en los estados de Tabasco y Campeche, que son zonas bajas. Este máximo está relacionado con el máximo climatológico de precipitación para el país y puede estar asociado con una región de persistente convergencia y convección en niveles bajos en la porción sur del Golfo de México.

Se identificaron superficies de descargas eléctricas mensuales, nube a tierra (2006 - 2010) en la República Mexicana, Centroamérica y zonas oceánicas adyacentes de enero a diciembre. Los datos fueron recalculados para el dominio de México, Centroamérica, sur de Estados Unidos y mares adyacentes, con una resolución espacial de 0.1 grados de arco, aproximadamente 11 km x 11 km. Esta variable se reporta en unidades del número de descargas eléctricas por km2 por mes.

Para Tulum se extrajeron los datos referidos a su territorio a partir de imágenes de satélite y geoprocesos. A partir de lo anterior, se cartografiaron los promedios mensuales de descargas eléctricas nube-tierra (mapa x) durante cinco años (2006 a 2010). Sin embargo, se debe comentar que no se encontraron datos más actuales, ya que no existe una base oficial de ellos en México. Asimismo, en el mapa x se expone los grados de peligro para esta amenaza.

5.3.6.2. Memoria de cálculo

En México existe la NORMA Mexicana ANCE emitida por la Asociación de Normalización y Certificación, A. C., "ANCE" y aprobada por el Comité de Normalización de la ANCE, "CONANCE", y por el Consejo Directivo de ANCE. Esta norma es de aplicación nacional. NMX-J-603-ANCE-2008. Es una guía que especifica el proceso a seguir para comprobar el cumplimiento del sistema de protección contra tormentas eléctricas (SPTE) de las estructuras o instalaciones, diseñado e instalado de acuerdo con el campo de aplicación de la NMX-J-549-ANCE. La anterior norma se encuentra basada en NMX-J-549-ANCE-2005.

A partir de la Norma Mexicana ANCE y el Sistema de Protección Contra Tormentas Eléctricas (SPTE), se definieron los siguientes rangos de peligrosidad según la densidad anual de rayos nube-tierra por kilómetro cuadrado, las cuales se muestra a continuación:

Amenaza por tormentas eléctricas

- ≥ 5 a < 7 = Peligro alto;
- ≥ 3 a < 5 = Peligro medio;
- ≥ 1 a < 3 = Peligro bajo
- ≥ 0 a < 1 = Peligro muy bajo,

Partiendo de esa escala de valores se realizaron los mapas de peligros por tormentas eléctricas para el municipio, en primer lugar, por mes para el periodo de 5 años, y en segundo, para todo el municipio comprendiendo los promedios por mes por año para esa escala de tiempo. El resultado se muestra a continuación.

5.3.6.3. Resultados de análisis

En las figuras 183, 184, 185 y 186 se muestran los resultados obtenidos. No obstante, para los primeros 6 meses peligro es bajo, es decir, los promedios mensuales de enero a junio no sobre pasan 1. En la primera (figura 183) de enero a abril se concentran del centro del municipio hacia el Este. En mayo y junio este fenómeno se observa más hacia la costa y la parte sureste.

En la figura 184 la distribución se muestra diferente para cada mes, en julio llega a obtener un promedio de 0.25, en agosto 0.33, en septiembre 0.71, en octubre 0.16, en noviembre 0.13 y en diciembre 0.01. Septiembre es el mes con mayor valor, lo cual puede asociarse al cambio de estación entre verano y otoño y a la temporada de huracanes.

Se debe tomar en cuenta que objetos más altos (edificios, antenas, por ejemplo) en una tormenta no siempre son alcanzados por un rayo. Es cierto que las entidades más altas están más cerca de las nubes, pero los rayos pueden caer al suelo a una distancia cercana a un objeto alto. Los objetos más altos pueden tener una mayor posibilidad de impacto, pero en lo que respecta a los rayos, la trayectoria del impacto no es predecible.

En la figura 185 se puede advertir que es la parte Este del municipio la que menos descargas eléctricas recibió entre 2006 y 2010, no obstante, su parte Oeste es la que más comprendió. El valor más alto alcanzado en las celdas de la imagen ráster muestra un peligro bajo a nivel general, sin embargo, aún debe ser tomado en cuenta para alertas de prevención, ya que es similar a la zona donde se produce granizo derivados de los ciclos atmosféricos convectivos que producen las tormentas.

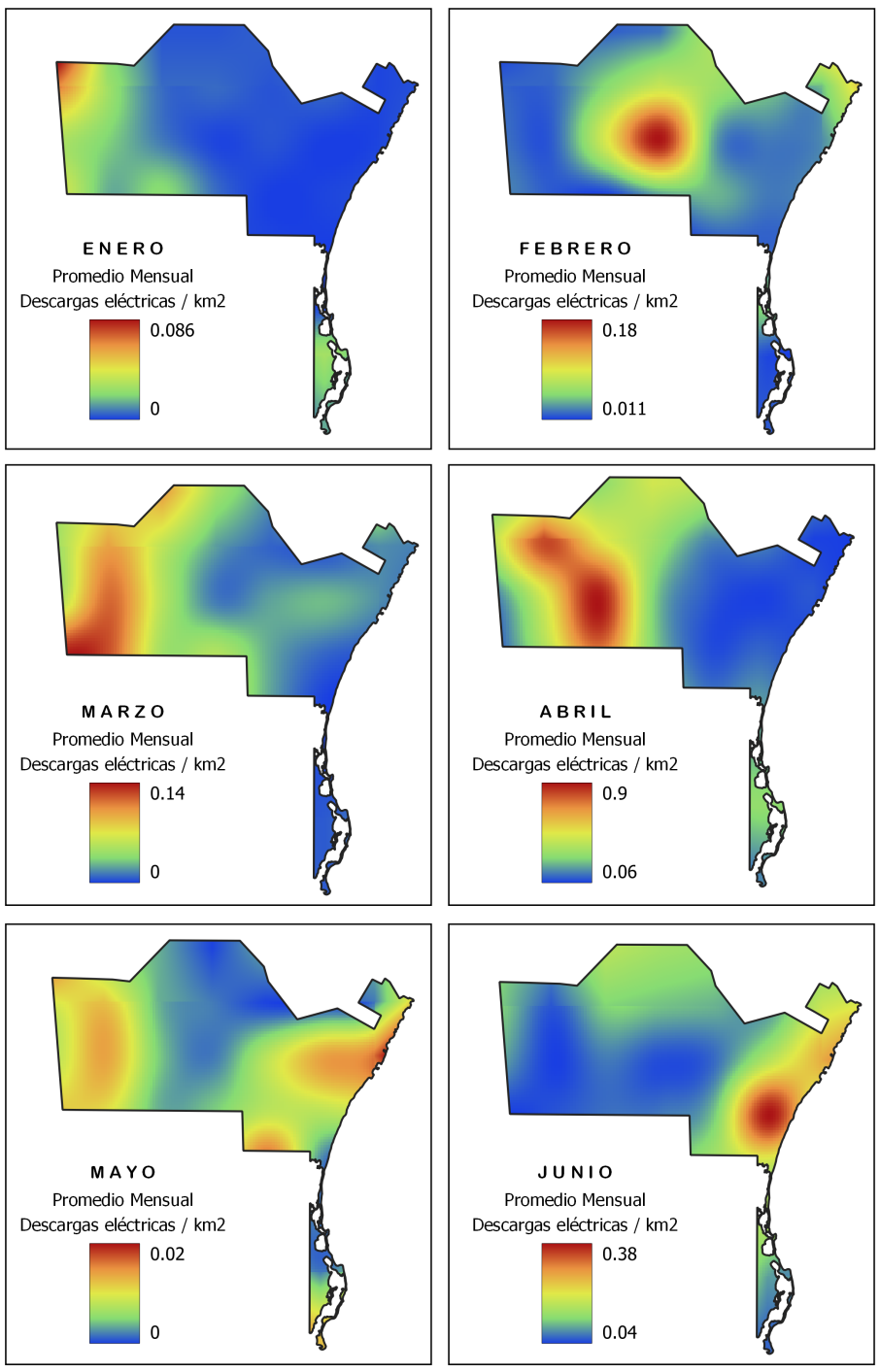
Por otra parte, en la figura 186, el resultado muestra una escala de peligrosidad a la amenaza de tormentas eléctricas, si bien, lo que se cartografió fueron las descargas eléctricas nube-tierra, estas se generan a partir de una descarga eléctrica entre las regiones positivas y negativas de una tormenta por lo que de esta manera se realizo la asociación. El mapa muestra tres niveles de peligro, aun cuando estas podían encajar en el nivel de peligro muy bajo y bajo de la escala general, se desagrego en una subescala donde <1 indica peligro bajo, entre 1 a 1.63 peligro medio y mayor a 1.63 peligro alto. Es así que observamos son aproximadamente 498 km2, aunque las descargas de nubes-tierra no son las más comunes, representan un mayor peligro para las personas y la propiedad que otros tipos de descargas.

5.3.6.4. Mapas de susceptibilidad por tormentas eléctricas

Los efectos de las tormentas eléctricas van desde herir o causar el deceso de una persona de forma directa o indirecta hasta dañar la infraestructura de la población, que provocaría la suspensión de la energía eléctrica, además de afectar algunos aparatos (radio, televisión, computadoras, refrigeradores, etc.). En ocasiones, las descargas eléctricas pueden provocar la muerte del ganado y son la causa más común del retraso de las aeronaves y de los accidentes aéreos (CENAPRED, 2021).

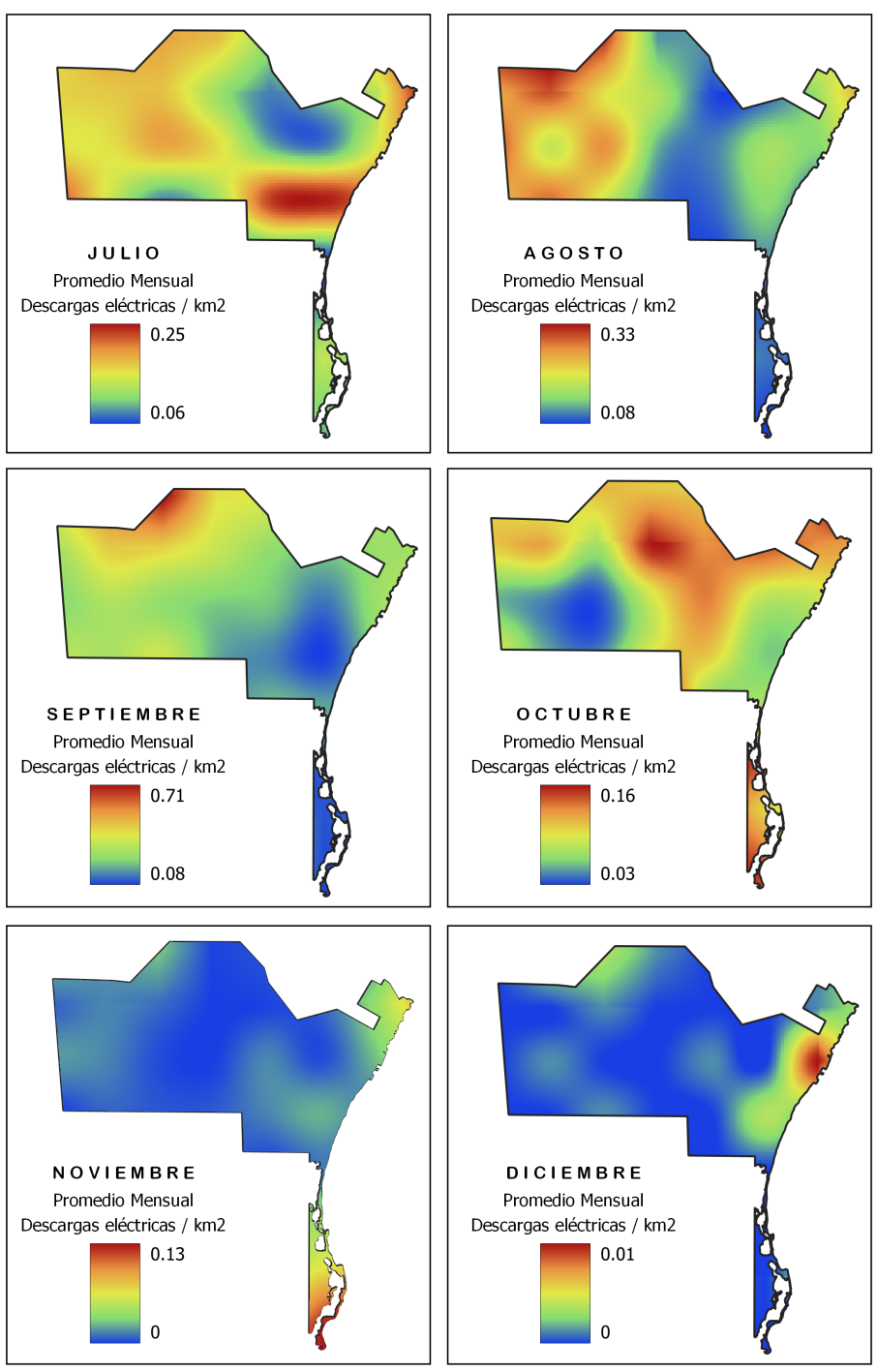
CENAPRED (2021), señala que las tormentas eléctricas en México ocurren entre mayo y octubre, con mayor frecuencia durante horas de la tarde o de la noche. Para el municipio de Tulum el promedio alcanzó 0.22 para mayo, 0.38 para junio, 0.25 para julio, 0.33 para agosto, 0.71 para septiembre y 0.16 para octubre, por lo que el mes con mayores descargas eléctricas registradas fue septiembre entre 2006 a 2010 (figuras 183 y 184).

Figura 183. Promedios mensuales de enero a junio (2006-2010)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 184. Promedios mensuales de julio a diciembre (2006-2010)



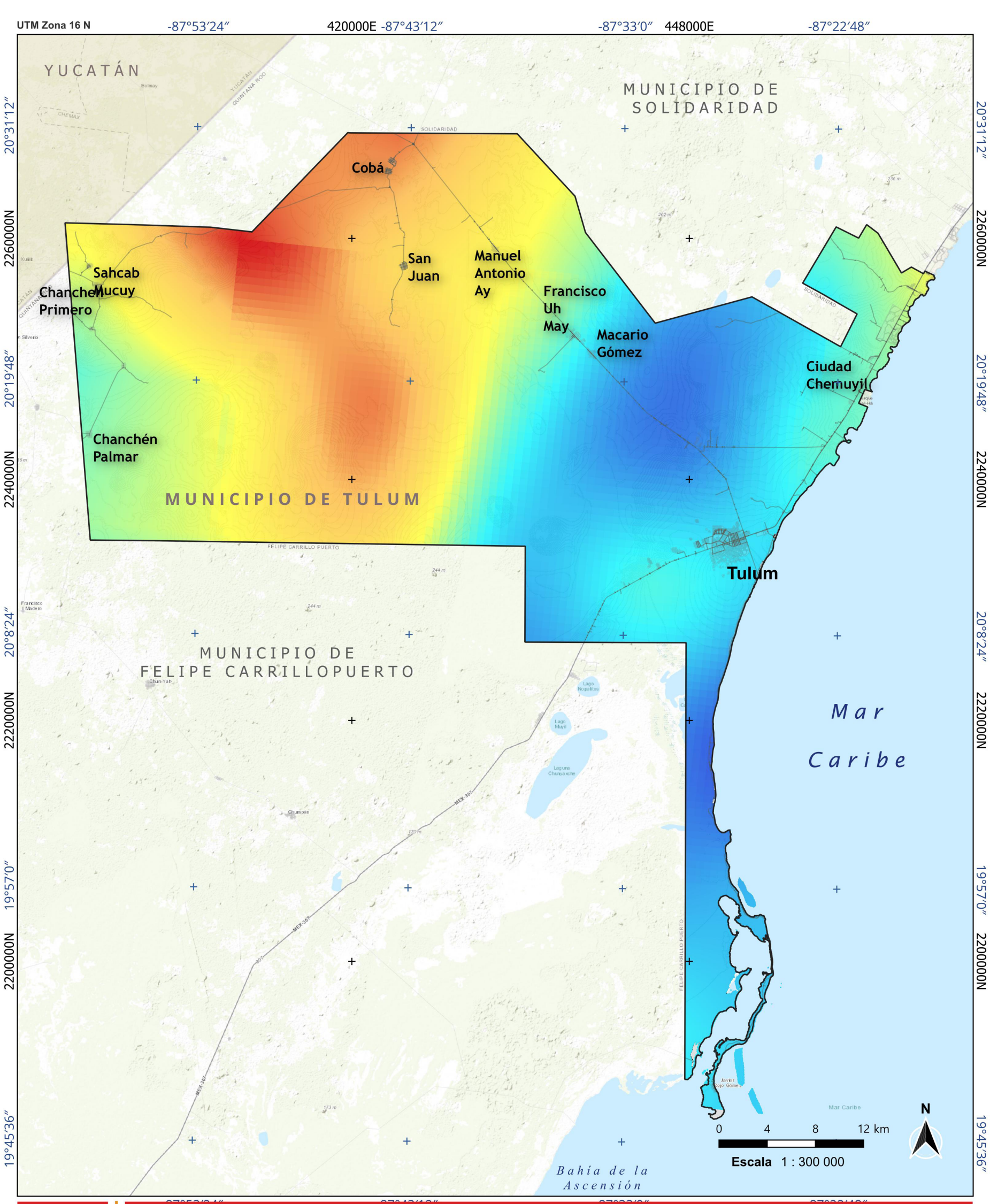
Fuente: Elaboración propia.

En los mapas resultado de este análisis (figuras 185 y 186) se puede observar que las zonas donde se contabilizaron más descargas eléctricas por kilómetro cuadrado fueron al norte del municipio, principalmente en la localidad de Cobá, en menor medida en las localidades de San Juan, Manuel Antonio Ay, Sahcab Mucuy, Chanchén Primero y Canchén Palmar. Al Este del municipio el grado de peligro fue mucho menor.

Se debe tener en cuenta que la distribución geográfica de las emisiones de nubes terrestres está estrechamente relacionada con la topografía y la dinámica local de las tormentas. Sin embargo, las corrientes descendentes son más frecuentes en los trópicos y las corrientes ascendentes son más comunes en las regiones templadas donde las temperaturas son más frías que en los trópicos.

El resultado obtenido muestra que una tercera parte del territorio se encuentra en peligro muy bajo y bajo, ya que el rango de los datos va de 0.72 a 2.09 descargas eléctricas por km2. Por lo que esta amenaza es de baja peligrosidad para su población. Sin embargo, la población debe tomar las medidas de protección dictadas por las autoridades de protección civil del municipio.

Figura 185. Mapa de promedios mensuales de descargas eléctricas para Tulum



Mapa de promedios mensuales de descargas eléctricas nube-tierra

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Promedios mensuales (número de descargas eléctricas por km2)

2.09

0.72

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Estado de Yucatán

Modelo Digital Elevación (metros)

41

0

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI. UNIATMOS. Descargas eléctricas mensuales, nube a tierra (2006 - 2010). Unidad Informatica para las Ciencias Atmosferica y Ambientales. Centro de Ciencias de la Atmósfera. (UNAM, 2011).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

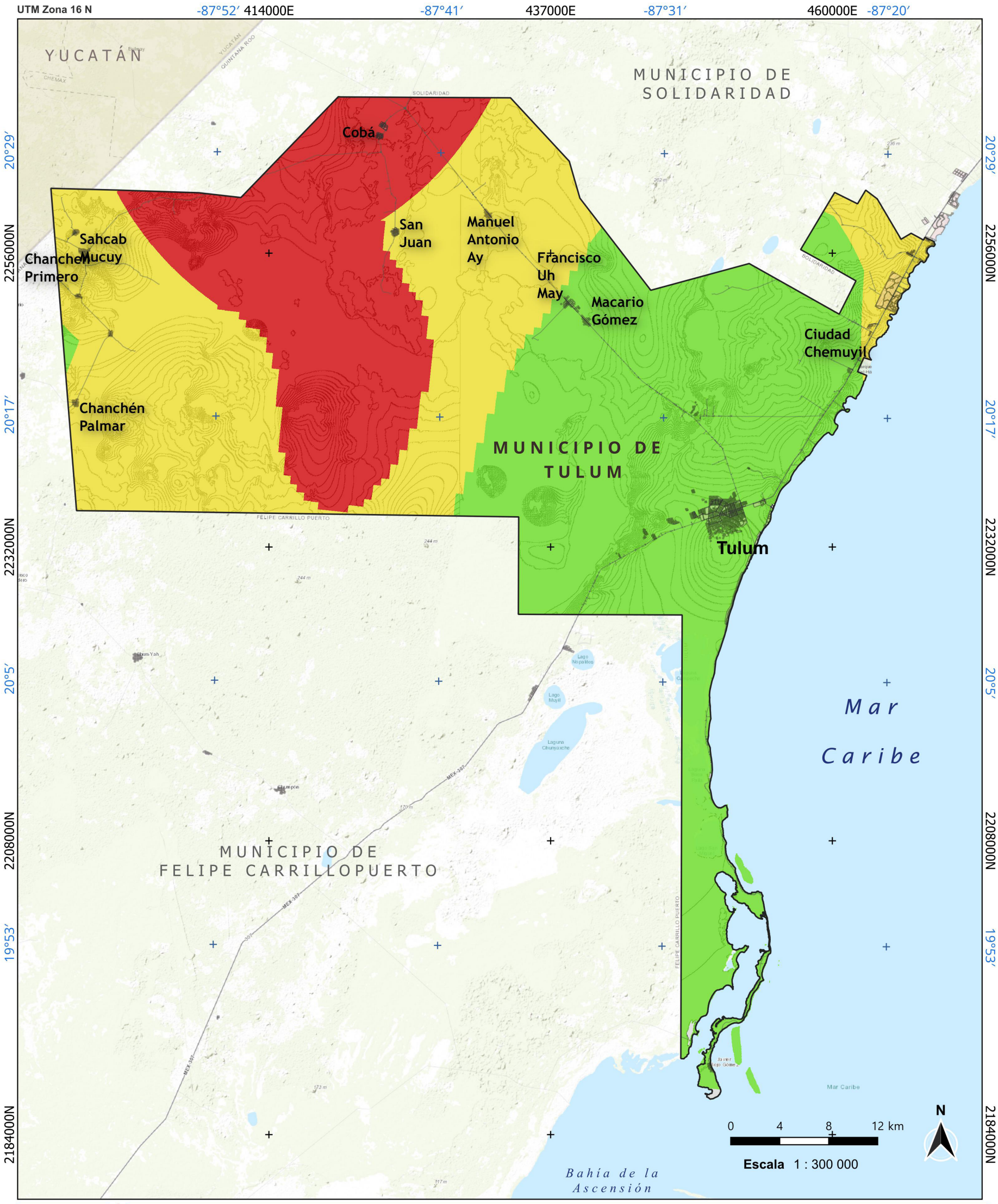
Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia

Figura 186. Mapa de peligrosidad por tormentas eléctricas Tulum



Mapa de peligro por descargas eléctricas nube-tierra

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Peligro nube-tierra
- > 1.63 (Alto)
- 1.0 - 1.63 (Medio)
- <1 (Bajo)

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Estado de Yucatán

Modelo Digital Elevación (metros)
- 41
- 0

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI. UNIATMOS. Descargas eléctricas mensuales, nube a tierra (2006 - 2010). Unidad Informatica para las Ciencias Atmosferica y Ambientales. Centro de Ciencias de la Atmósfera. (UNAM, 2011). Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

5.3.7. Tornados

Los tornados y las trombas marinas se han observado y documentado en México desde el siglo XVI (Velasco Fuentes 2010 cit. León-Cruz, Pineda-Martínez & Carbajal, 2022), pero no recibieron mucha atención hasta épocas recientes. En la memoria colectiva de la población, estos fenómenos fueron generalmente considerados como eventos anecdóticos. Sin embargo, los tornados han sido ignorados como un evento climático de alto impacto en México y no han sido registrados ni informados excepto cuando los tornados causan daños estructurales, lesiones o muerte.

Figura 187. Afectación por tornado en Ciudad Acuña, Coahuila, 2015



Fuente: Alcaldes de México (mayo 25 2015) (https://www.alcaldesdemexico.com/notas-principales/tornado-categoria-4-azota-ciudad-acuna-coahuila-video-y-galeria/) y La Poderosa (3 de junio 2015) Trayecto del tornado en Acuña Coahuila del 25 de mayo de 2015 (https://www.imer.mx/lapoderosa/trayecto-del-tornado-en-acuna-coahuila-del-25-de-mayo-de-2015/).

La importancia de esta amenaza meteorológica en el país inicia en 2007, con el tornado de Piedras Negras, Coahuila, ya que causo diversos daños. Entre 2008 y 2012 se presentaron en el centro de México tornados menos fuertes. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) reporto en sus informes anuales de 2018 a 2020, 12, 23 y 30 eventos a nivel nacional (CONAGUA 2018, 2019, 2020, cit. León-Cruz, Pineda-Martínez & Carbajal, 2022). El aumento del interés por este fenómeno parte del tornado supercélula ocurrido en Ciudad Acuña, Coahuila, cerca de la frontera entre México y EE. UU., el 25 de mayo de 2015, por la comunicación mediática que se le dio (figura 187).Por otra parte, León-Cruz & Castillo-Aja (2022), señalan que existen algunos estudios sobre tornados desde la meteorología y otros desde condiciones de mesoescala que favorecen las tormentas de superceldas y tornados en el país. Asimismo, siguen señalando que también se ha investigado el riesgo de ocurrencia de tornados, sin embargo, la evaluación del riesgo de tornados desde un punto de vista geoespacial sigue siendo un tema pendiente, ya que no existe un mapeo del riesgo de tornado en México.

De la misma manera, León-Cruz, Pineda-Martínez & Carbajal, (2022) señalan que se cuenta con un proyecto de recopilación y sistematización de datos sobre tornados para México con información más reciente. Este estudio mostró que los tornados y las trombas marinas son más comunes de lo que se creía, lo que conlleva a que se ha subestimado la actividad de tornados en el país.

Características de los tornados

La formación de las nubes y de las precipitaciones en la atmósfera resulta, lo más frecuentemente, de los movimientos verticales. Se hacen visibles por la formación de nubes, pudiéndose producir igualmente los movimientos verticales en ausencia de nubes.

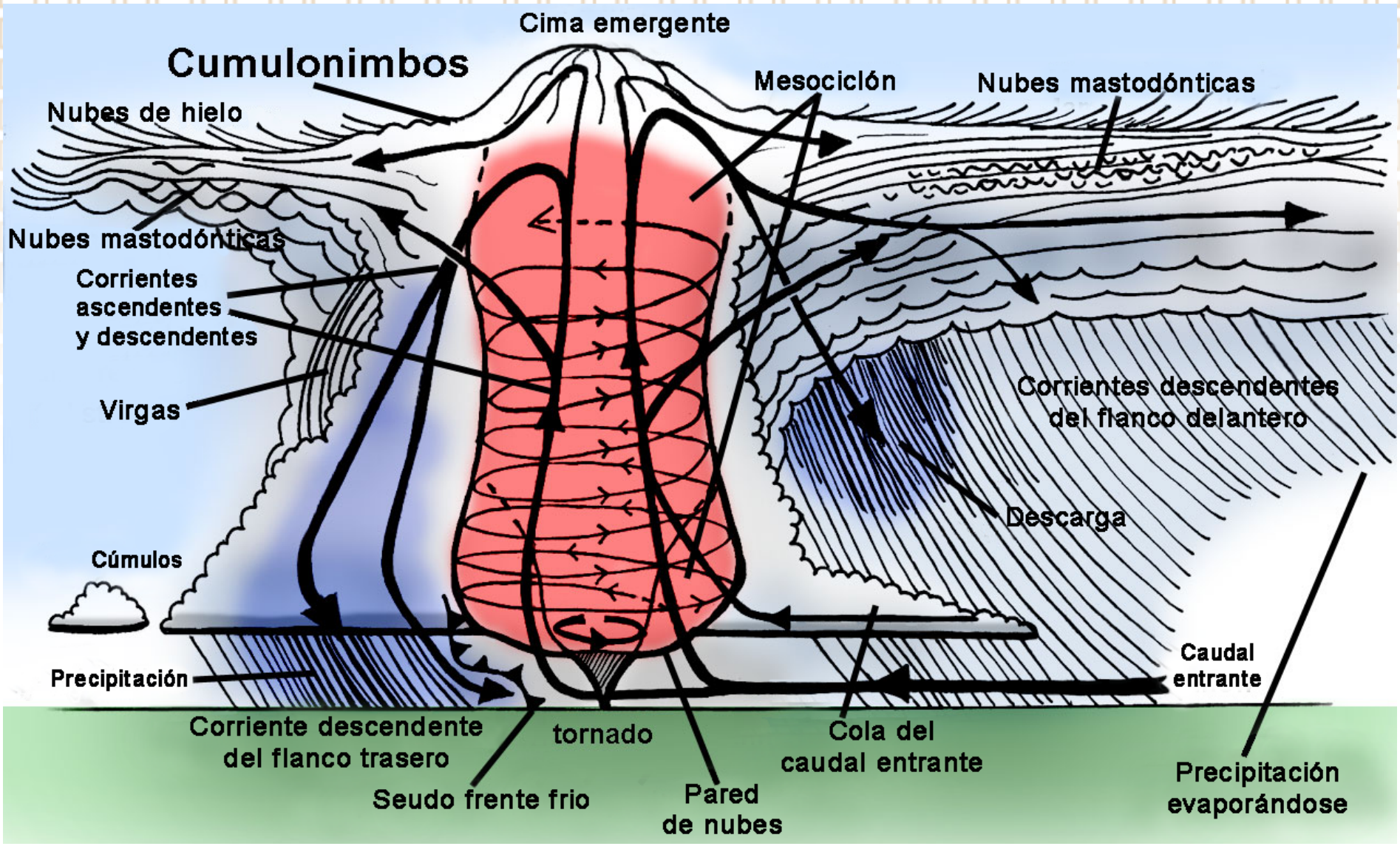
Los movimientos verticales en la atmósfera son menores que los movimientos horizontales, sin embargo, si están bien desarrollados o extendidos, pueden tener efectos importantes. Los movimientos verticales son la causa de diversos fenómenos meteorológicos.

Cuando se habla de estabilidad o inestabilidad atmosférica se está hablando de “la capacidad que tiene un entorno atmosférico para modificar su estado en virtud de una fuerza exterior que podemos llamar forzamiento”. Existen diversas situaciones en las que el aire se ve forzado a ascender creando situaciones de inestabilidad atmosférica.

Los tornados suelen ocurrir en la zona de transición entre las masas de aire polar y tropical entre las latitudes 20º y 50º a ambos lados del ecuador, y raramente a latitudes superiores a los 60º el aire no contiene la humedad y temperatura necesarias para la formación de este fenómeno. Y en las regiones ecuatoriales, donde la atmósfera no presenta la inestabilidad necesaria para el desarrollo de fuertes tormentas de tal intensidad (Jonkepa, 2013).

Los tornados se presentan en varios países, en diferentes variaciones estacionales, sucediendo con mayor ocurrencia durante el verano en las latitudes medias, entre junio, julio y agosto. Entre marzo y abril su ocurrencia se centra cerca de la costa del Golfo de México. A medida que avanza el año, el centro del área de formación de tornados más grande se mueve más al norte en los Estados Unidos. El motivo de este movimiento está relacionado con el movimiento de masas de aire en la misma dirección asociado al desarrollo de tornados (figura 188).

Figura 188. Vista de una supercelda



Fuente: Tomada de https://nauticajonkepa.files.wordpress.com/2013/05/supercell_side_view_es.png

Los tornados pueden ocurrir en cualquier momento del día, y la mayoría ocurre entre las 14 y las 20:00 hrs lo que se asocia con el máximo calentamiento diario de la superficie terrestre, ya que las altas temperaturas contribuyen a la inestabilidad atmosférica ya la formación de tormentas, que suelen dar lugar a la aparición de tornados (figura 188).

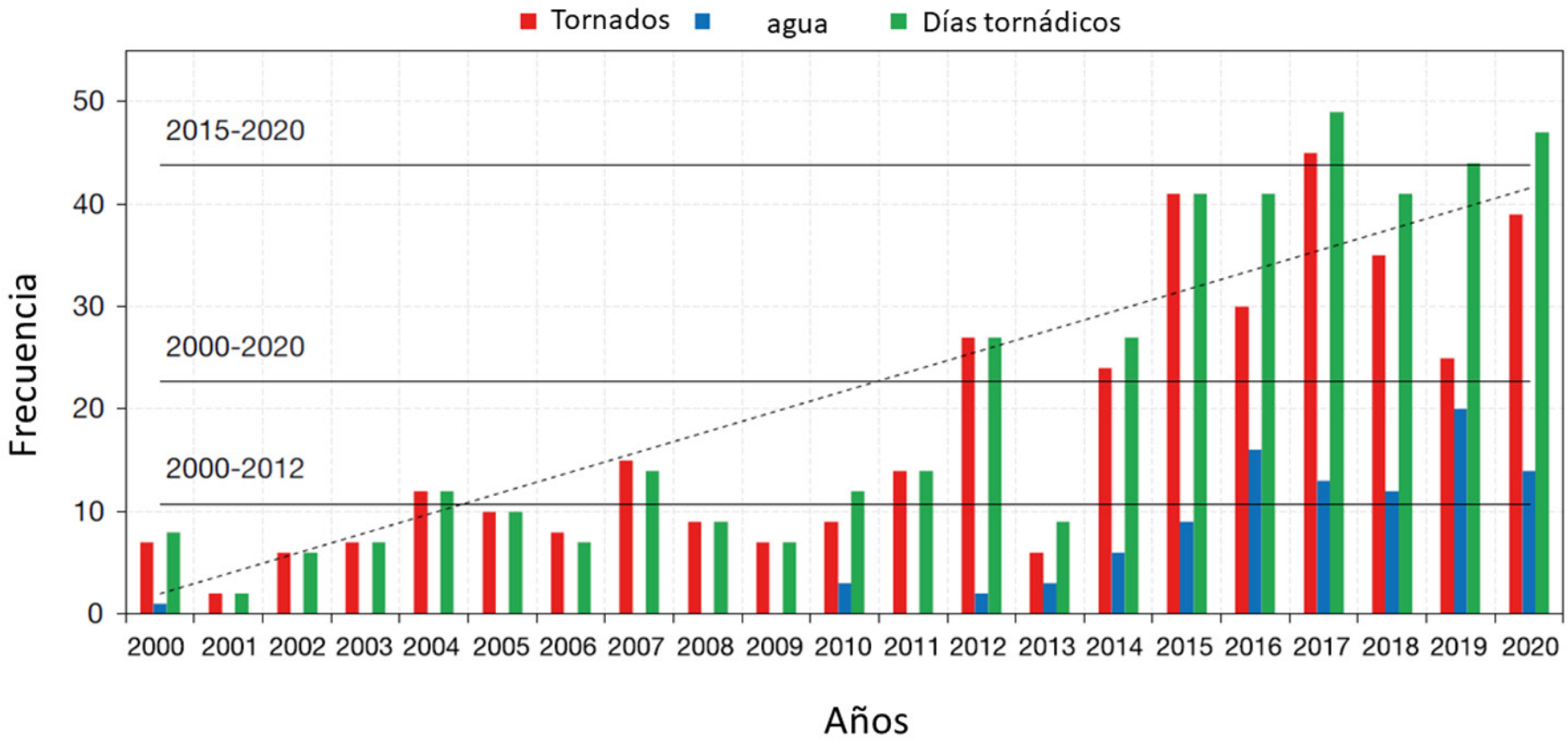
Las características de los tornados típicos incluyen un diámetro de 2 km o menos, con diferencias máximas de velocidad del viento a lo largo de la circulación que superan los 40 m s−1 dentro de los 200 m de la superficie. Los tornados suelen durar del orden de 100 a 1000 segundos (AMS, 2020).

Los tornados que ocurren sobre el agua se clasifican como trombas marinas. Las trombas terrestres son un subconjunto de tornados que ocurren independientemente de un mesociclón principal.

Los *gustnados* (nube tornádica y de corta vida, de bajo nivel que puede formar un temporal), no se consideran tornados ya que son vórtices poco profundos y de corta duración que suelen ser débiles. Los remolinos de polvo no se consideran tornados ya que no están asociados con nubes cumulonimbos.

La recopilación actualizada de eventos de tornados para México realizada por León-Cruz, Pineda-Martínez & Carbajal, (2022) entre el 2000 al 2020 considera un total de 378 tornados y 99 trombas marinas distribuidas más de 434 días de tornados o días tornádicos (figuras 189 y 190). Estos incluyen sistemas convectivos de mesoescala, ciclones tropicales y frentes fríos.

Figura 189. Distribución anual de tornados, trombas marinas y días de tornados documentados para México 2000−2020.



Fuente: Tomado de León-Cruz, Pineda-Martínez & Carbajal, (2022). Las líneas continuas negras indican medias anuales para diferentes períodos. La línea discontinua negra muestra la tendencia lineal.

Figura 190. Tornados, trombas de agua y gustnados

Tornado



Tromba marina

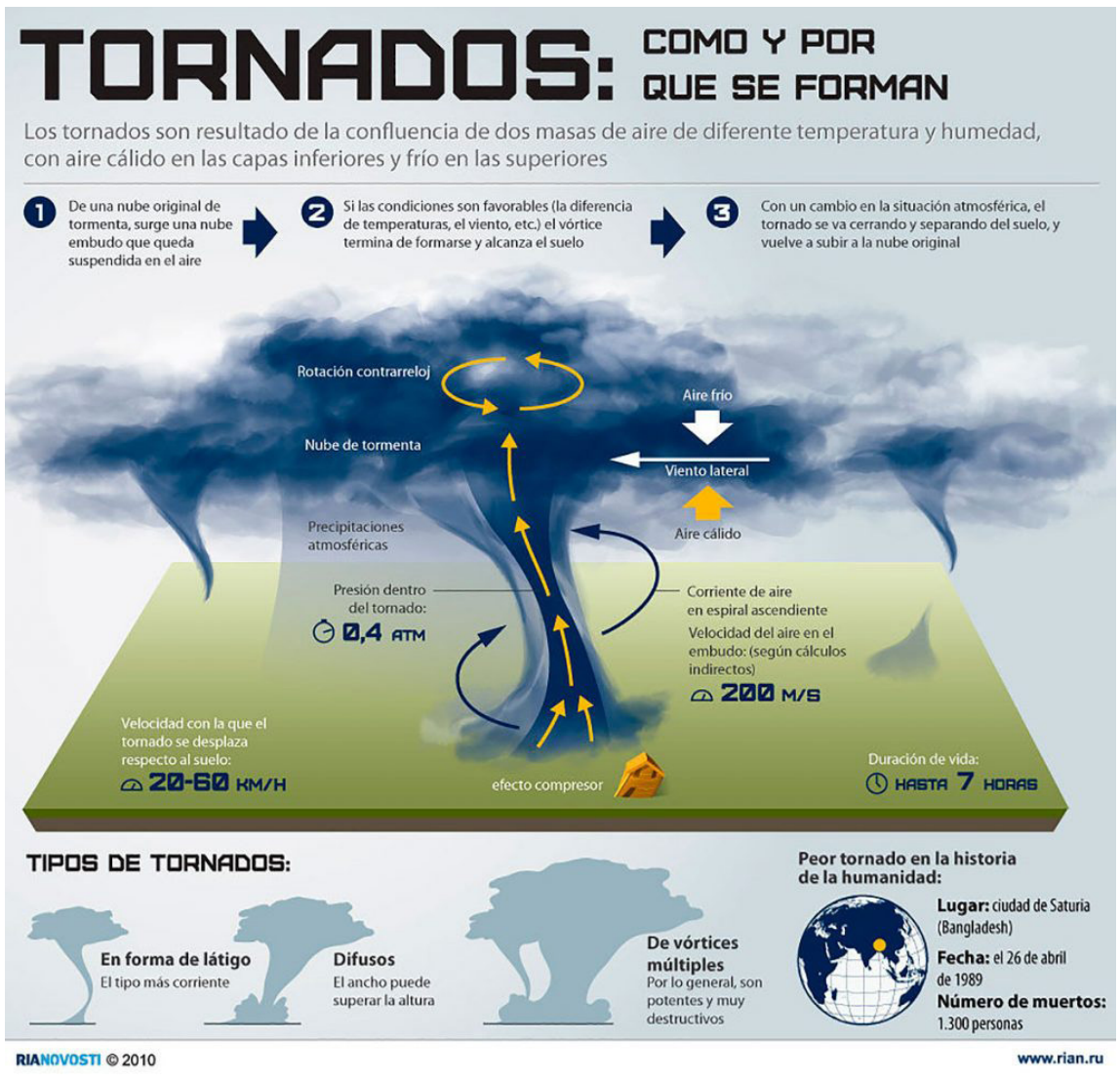


Gustnados



Fuentes de las imágenes: Gobierno de México (https://www.gob.mx/conagua/articulos/tornados-maxima-expresion-del-viento?idiom=es); Infobae (https://www.infobae.com/america/mexico/2020/10/06/las-impresionantes-trombas-que-ha-dejado-gamma-y-delta-a-su-paso-por-yucatan-y-cancun/); Meteored (https://www.meteored.com.ar/noticias/ciencia/fenomenos-meteorologicos-que-es-un-gustnado.html).

Figura 191. Como se forman los tornados.



Fuente: INVDES (2019): https://invdes.com.mx/infografias/tornados-como-y-por-que-se-forman/

Definición y formación

La American Meteorological Society (AMS) define a los tornados en su Glosario de Meteorología como:

> *Una columna de aire que gira rápidamente y se extiende verticalmente desde la superficie hasta la base de una nube cumuliforme, a menudo con escombros/polvo circulando cerca de la superficie cuando se encuentra sobre la tierra o rocío cuando se encuentra sobre el agua. Aunque no se requiere su presencia, una nube de embudo a menudo es visible y puede extenderse parcial o totalmente desde la base de la nube hasta el suelo.*

El tornado es un fenómeno meteorológico que se produce a raíz de una rotación de aire de gran intensidad y de poca extensión horizontal, que se prolonga desde la base de una nube madre, conocida como Cumulunimbus. La base de esta nube se encuentra a altitudes por debajo de los 2 km y se caracteriza por su gran desarrollo vertical, en donde su tope alcanza aproximadamente los 10 Km de altura hasta la superficie de la tierra o cerca de ella.

Los tornados son resultado de la confluencia de dos masas de aire de diferente temperatura y humedad, con aire cálido en las capas inferiores y frío en las superiores (figura 191).

La nube es de color blanco o gris claro mientras que el embudo permanece suspendido de la nube madre, cuando éste hace contacto con la tierra se presenta de un color gris oscuro o negro debido al polvo y escombros que son succionados del suelo por el violento remolino. Estos torbellinos llamados también chimeneas o mangas, generalmente rotan en sentido contrario a las manecillas del reloj, en el hemisferio Norte. En algunas ocasiones se presentan como un cilindro, cuyo diámetro varía entre la base de la nube y la superficie del suelo y su diámetro inferior es aproximadamente de 1 Km alcanzando algunas veces los 100 metros.

Existen diferentes tipos de tornados, tornado de vórtices múltiple, tromba marina y tromba terrestre (tabla 103). Asimismo, existen fenómenos que parecen tornados, pero no lo son, como: gustnado, remolino de polvo o de arena, remolino de fuego, remolino de vapor.

Tabla 103. Tipos de tornados

Tornado de vórtices múltiples		Este es un tornado en el que dos o más columnas de aire en movimiento giran alrededor de un centro común. Puede aparecer con circulación de aire, pero es más común en tornados intensos.
Tromba marina		También conocido como manga de agua, este es un tornado posicionado sobre el agua. Se forman en aguas tropicales y subtropicales en el fondo de nubes llamadas Cumulus congestus.
Tromba terrestre		También conocidos como tornados no supercelulares, tornados o nubes de embudo o landspout en inglés, estos tornados no están relacionados con los mesociclones. Tienen una vida útil corta y un embudo de condensación fría que apenas toca el suelo. Por lo general, son más débiles que los tornados típicos, pero pueden causar daños importantes.

Fuente de las imágenes: http://tornadosiii.blogspot.com/2012/12/tornados-verdaderos-tornado-de-vortices.html; https://www.infobae.com/america/mexico/2019/08/08/una-enorme-tromba-marina-sorprendio-a-los-turistas-en-coatzacoalcos-veracruz/; https://latinus.us/2020/05/08/tromba-apodaca-nuevo-leon-deja-seis-lesionados/

Características más comunes para identificar un tornado

El desplazamiento de los tornados tiende a ser dominado por el movimiento de la tormenta o nube madre, a veces se observa que el embudo se libera de la base moviéndose en forma errática.

Monterde et al., 2023 señalan que la topografía del terreno incide en la convergencia de las masas de aire, la humedad, los cambios en la dirección y velocidad del viento, y que una topografía reducida confirma la relevancia de una tornadogénesis. Asimismo, apuntan que son necesarias más investigaciones para aumentar el conocimiento de cómo las características del terreno pueden inducir entornos de tornados, especialmente en las regiones tropicales, donde estos fenómenos están poco explorados.

a) El tornado se forma en conexión con una nube de tormenta, llamada “Cumulonimbus”.

b) El tornado aparece en la base de la nube “Cumulunimbus” y se extiende hacia abajo hasta alcanzar el suelo en forma de embudo o manga.

c) Comúnmente un tornado va acompañado por lluvia, granizo, relámpagos, rayos y de la oscuridad propia de las nubes.

d) Una característica común, es la baja presión atmosférica (fuerza por unidad de área, ejercida sobre una superficie determinada) en el centro de la tormenta y enorme velocidad del viento.

e) El efecto de destrucción de un tornado es mayor en el área afectada que el de un huracán, debido a que la energía por liberar se concentra un área más pequeña. Por tanto, el efecto de la velocidad del viento y la baja presión hace que el daño sea mayor.

f) Los tornados se desplazan aproximadamente a 50 Km/h, sin embargo, algunos se mueven lentamente, mientras otros alcanzan velocidades de 100 Km/h o más. La trayectoria promedio de un tornado es de unos 400 metros de ancho y unos cuantos kilómetros de largo. Algunas de éstas han alcanzado valores excepcionales de 1.6 Km de ancho y 480 Km de largo.

Composición y escalas

La mayoría de los tornados se producen por la inestabilidad atmosférica, debido al calentamiento diurno y la gran cantidad de humedad o frentes fríos (línea de separación entre dos masas de aire una fría y seca y, la otra, cálida y húmeda, se caracteriza por que la masa de aire frío va seguida de la masa de aire cálido) que se encuentran activos, agrupados en familias o en conexión con tormentas aisladas de gran intensidad. La chimenea del tornado es una nube constituida por gotitas de agua mezcladas con polvo y partículas de desechos, las cuales nacen en las bases de las nubes y descienden hacia la superficie. En las proximidades del suelo el polvo y los desechos son muy abundantes, debido a la baja presión atmosférica existente que contribuye a que el aire circule hacia dentro y ascienda.

En el interior, en las paredes que forma el ojo del tornado normalmente se producen descargas eléctricas. Algunos tornados están constituidos por una sola chimenea, mientras que otros forman un sistema de varias chimeneas. Unos duran pocos segundos, otros persisten durante decenas de minutos.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) presenta la Escala Fujita mejorada para medir la intensidad de los tornados (tabla 104). La fuerza de un tornado puede estimarse a partir de la gravedad del daño causado (figura 192).

Tabla 104. Escala Fujita mejorada para medir la intensidad de los tornados

Número de la escala Fujita mejorada	Velocidad del viento en las ráfagas de tres segundos	Daños
0	29,2–38,1 m/s 105–137 km/h	Daños menores: Tejas arrancadas por el viento o partes de los tejados desprendidas; daños a canalones o revestimientos; ramas de los árboles rotas; árboles con raíces poco profundas derrumbados.
1	38,3–49,4 m/s 138–178 km/h	Daños moderados: daños significativos en los tejados; ventanas rotas; puertas exteriores dañadas o perdidas; viviendas móviles volcadas o con daños importantes.
2	49,7–60,6 m/s 179–218 km/h	Daños considerables: tejados arrancados de casas de construcción sólida; casas separadas de los cimientos; viviendas móviles totalmente destruidas; árboles grandes partidos o arrancados de sus raíces; vehículos lanzados por los aires.
3	60,8–73,9 m/s 219–266 km/h	Daños graves: destrucción de pisos enteros de casas de construcción sólida; daños significativos a edificios grandes; casas con cimientos débiles arrasadas; desprendimiento de la corteza de los árboles.
4	74,2–89,4 m/s 267–322 km/h	Daños devastadores: Casas de construcción sólida derrumbadas, coches lanzados a distancias significativas, caída probable de las paredes exteriores de los pisos superiores de edificios de ladrillo.
5	>89,4 m/s >322 km/h	Daños masivos o increíbles: Casas bien construidas arrasadas; estructuras de hormigón armado extremadamente dañadas; edificios de gran altura con daños estructurales graves; árboles generalmente partidos y despojados por completo de la corteza y las ramas.

Fuente: Organización Meteorológica Mundial (https://cloudatlas.wmo.int/es/tornado-intensity.html)

Figura 192. Escala mejorada de Fujita



Fuente: Enseñanzas naúticas (https://nauticajonkepa.wordpress.com/2013/05/22/escala-fujita-de-tornados/)

5.3.7.1. Metodología

La metodología empleada se concentro en los datos obtenidos por León-Cruz & Castillo-Aja (2022), los cuales solo se reducen a trombas marinas para el municipio de Tulum, entre 2016 y 2017.

Se procesaron los conjuntos de datos de puntos que contenían la ubicación las trombas marinas, usando un sistema de información geográfica (SIG) para calcular un mapa de susceptibilidad aplicando un buffer de 3 kilómetros (área de influencia).

Las trombas marinas pueden ser peligrosas para embarcaciones, por ejemplo, provocando que los vehículos marinos vuelquen y provoque daños personales o materiales graves.

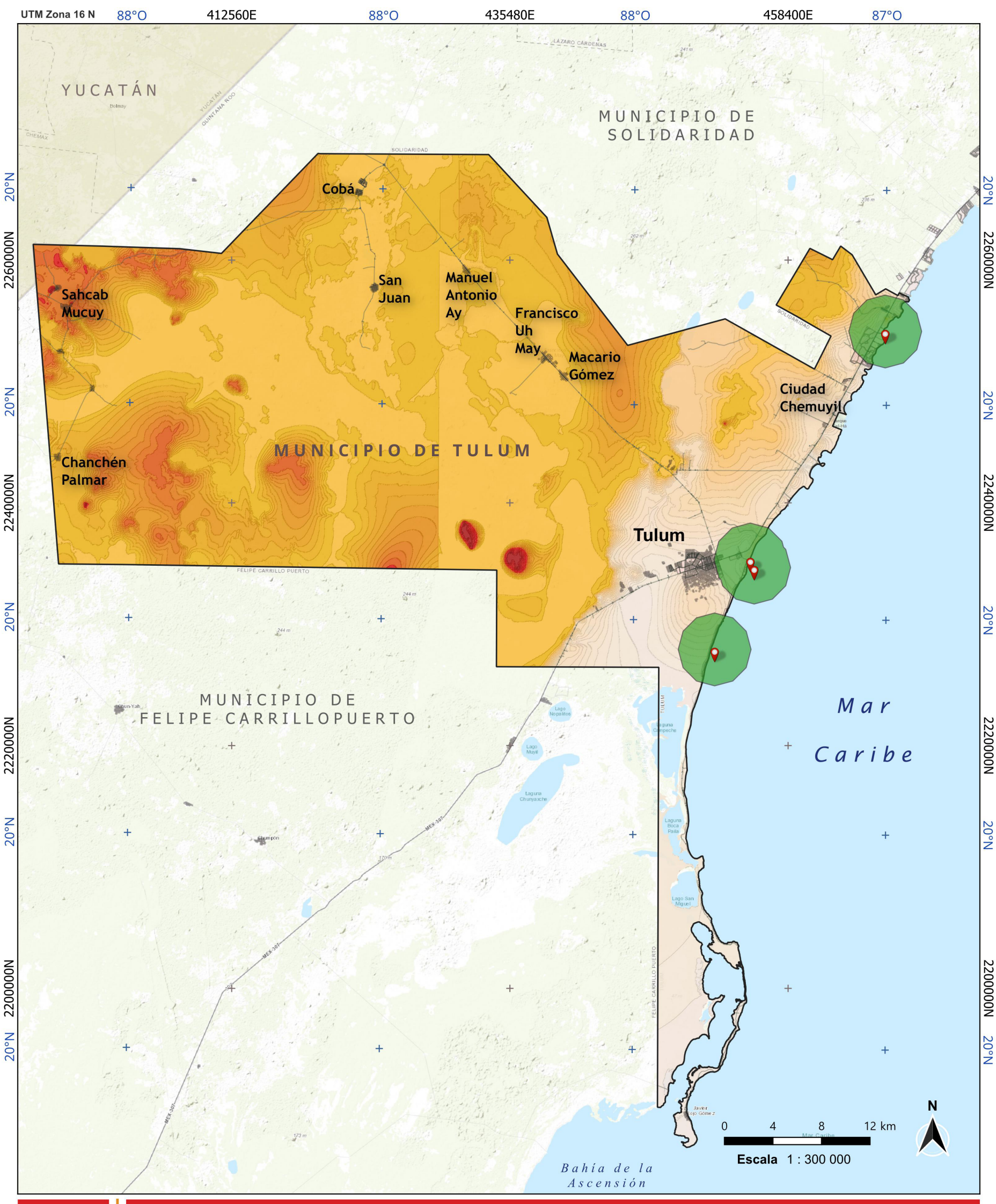
Por otra parte, cuando una tromba marina toca tierra, pierde la fuente de calor y humedad del agua del mar, por lo que se debilita y se disipa, por lo que tierra adentro no podría causar los mismos daños que sobre la superficie del mar.

5.3.7.2. Resultados

Si bien el 70% de los tornados se producen en los Estados Unidos, los registros para el municipio de Tulum se centran en las trombas marinas, hasta ahora. En la figura x se muestra los cuatro eventos registrados entre 2016 y 2017 por León-Cruz & Castillo-Aja (2022). Tornados o trombas terrestres no se han presentado en el territorio municipal.

Si bien estos fenómenos no presentan ningún daño al municipio, si se recomienda que los encargados de Protección Civil cuenten con los registros de estos fenómenos para poder determinar las zonas más vulnerables a ellos.

5.3.7.3. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados



Mapa de trombas marinas

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

- Trombas marinas
- Área de influencia
- Traza urbana
- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Red vial
- Estado de Yucatán
- Modelo Digital Elevación (metros): 41 / 0

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI. Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018). León-Cruz, J.F., Castillo-Aja, R. A GIS-based approach for tornado risk assessment in Mexico. Nat Hazards 114, 1563–1583 (2022). https://doi.org/10.1007/s11069-022-05438-0

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia

5.3.8. Tormentas severas

Se puede definir a una tormenta severa como aquella tormenta que es susceptible de producir daños materiales importantes, muertes o ambos (Eslava, 2020). Generalmente, las tormentas severas vienen acompañadas de lluvias intensas, vientos fuertes y pueden producir granizo, rayos y truenos, inundaciones repentinas e incluso, tornados. Si se presentan sobre el océano, también producen oleaje alto y marejada intensa (CENAPRED, 2021).

Para la formación de una tormenta severa es necesario que se desarrollen las nubes conocidas como cumulunimbus. Éstas son densas y de considerable dimensión vertical, en forma de coliflor. Una parte de su región superior es generalmente lisa, fibrosa o estriada y casi siempre aplanada, la cual se extiende frecuentemente en forma de yunque o de vasto penacho. En la figura 193 se muestran nubes cumulunimbus típicas, la cual puede desarrollar una tormenta severa.

Figura 193. Nubes de tormenta (cumulonibus).



Fuente: Atlas Internacional de las nubes (https://cloudatlas.wmo.int/es/observation-of-clouds-from-aircraft-descriptions-cumulonimbus.html)

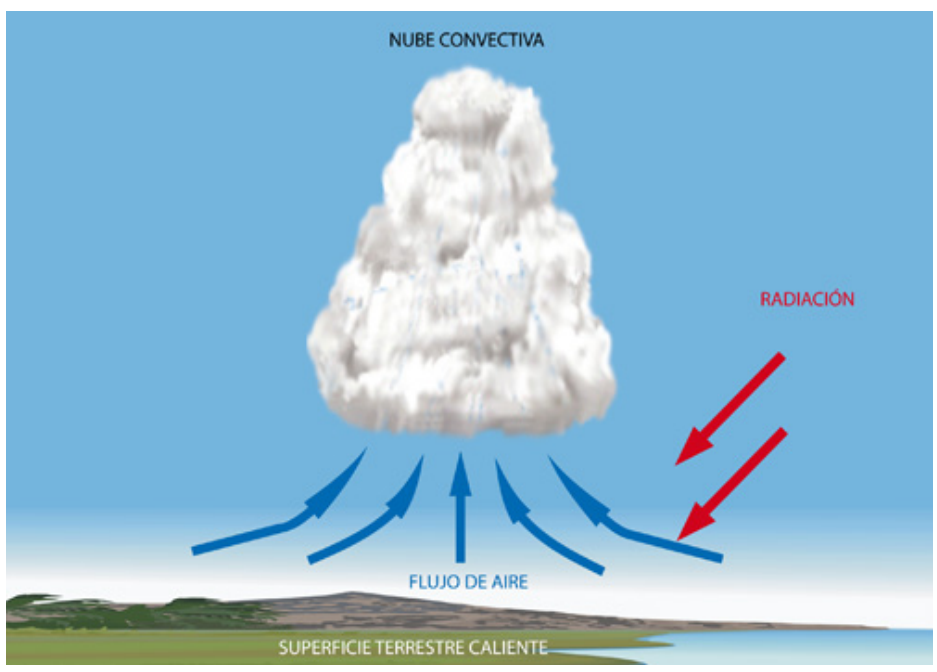
Las nubes de este tamaño no se desarrollan al menos que tengan la suficiente energía, y esto significa que la masa de aire ambiental necesita contener importantes cantidades de vapor de agua distribuidas por toda la capa vertical (figura 193). Además de estas condiciones se necesita de un mecanismo disparador para el desarrollo de las nubes y la ausencia de factores que inhiban o restrinjan su desarrollo hasta su madurez, tales como una inversión térmica en los niveles medios de la atmósfera.

Formación de tormentas severas

Hay tres procesos principales que proporcionan una fuente de aire húmedo ascendente para formar nubes cumulonimbus:

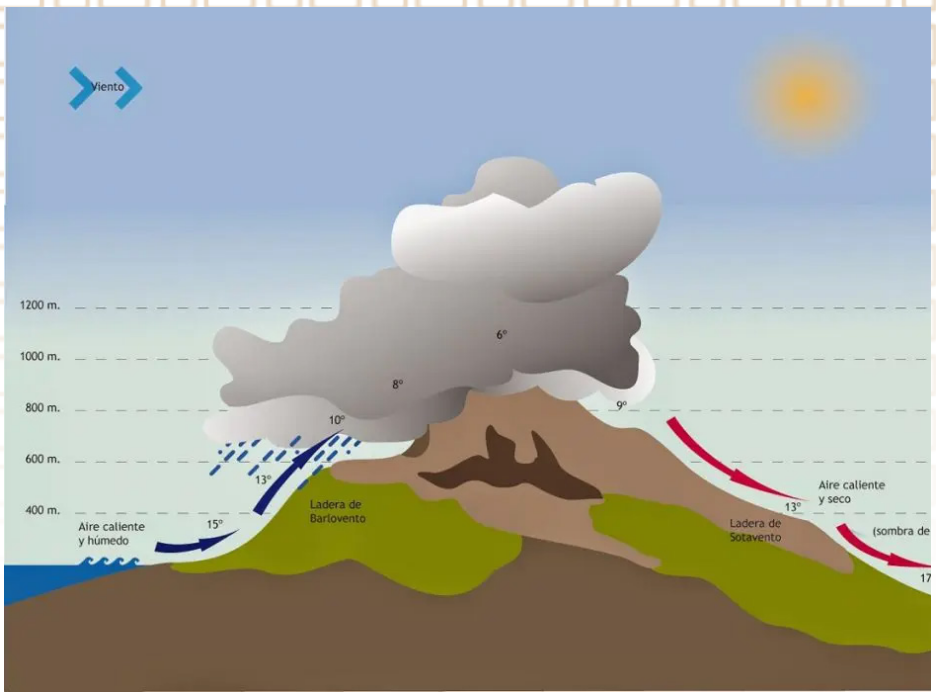
- Convección
- Ascenso orográfico
- Convergencia / ascenso general

Figura 194. Formación de nubes por convección del aire calentado por la radiación solar



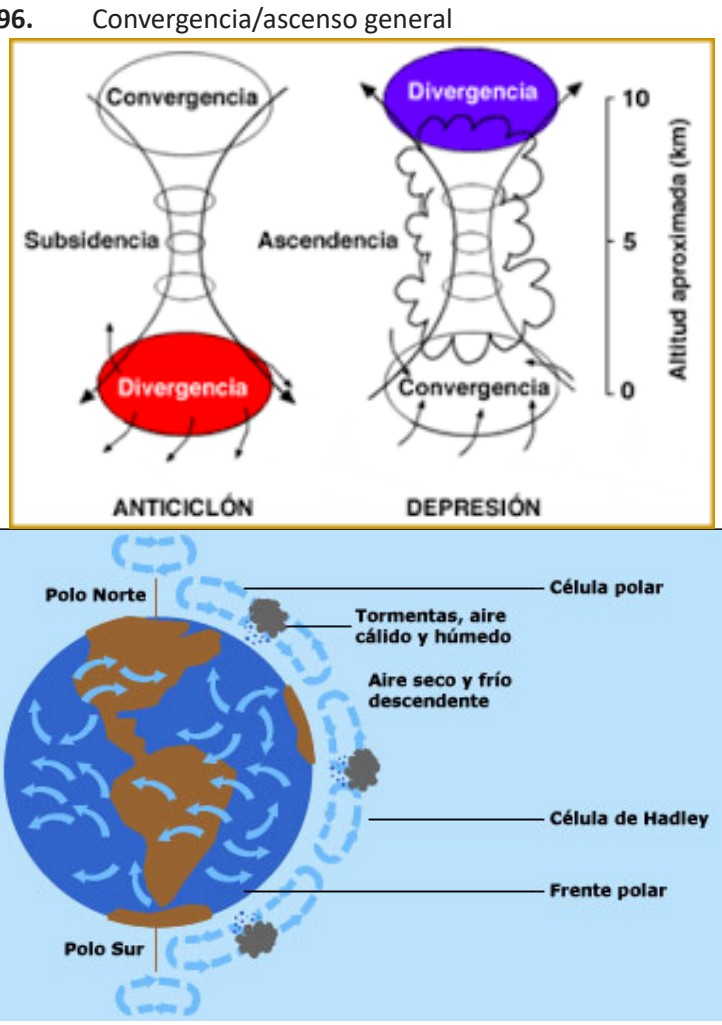
Fuente: EL CLIMA (https://slideplayer.es/slide/10176323/) y Eslava (2020).

Figura 195. Formación de nubes por ascenso orográfico



Fuente: https://www.meteorologiaenred.com/lluvia-orografica.html

Figura 196. Convergencia/ascenso general



Fuente: https://smn.conagua.gob.mx/ y https://www.ambientum.com/

En invierno, el aire sobre los continentes es más frío que el aire sobre los océanos. Debido a esto, aparecen bajas presiones de aire sobre los océanos, siendo los más importantes los llamados ciclones aleutianos sobre el océano Pacífico y los ciclones islandeses sobre el océano Atlántico. Se forman bolsas de alta presión en los continentes, los más importantes son la Alta Siberia en Asia central y Canadá en el norte de América del Norte. En verano, la situación se invierte. En esta época del año, los continentes son más cálidos que los mares. Por esta razón, se forman sistemas de baja presión y se forman sistemas de alta presión en el mar. Los más importantes de estos son las Altas de las Azores ubicado en el Océano Atlántico y Alta Hawaiana ubicado en el Océano Pacífico.

Las áreas de baja presión están asociadas con lluvias y tormentas, entre ellas los frentes fríos. El aire sobre el suelo es cálido y húmedo. A medida que el aire asciende, se enfría y pierde su capacidad de retener el vapor de agua, por lo que se condensa y precipita para convertirse en lluvia (Ambientum, 2022). Existen diversos fenómenos atmosféricos, además de la precipitación, que suelen acompañar a las tormentas severas, entre los que se encuentran los chubascos, ráfagas frontales, los rayos, los truenos, el granizo y los tornados (CENAPRED. 2021).

Generación de tormentas severas por frentes fríos

En meteorología, un frente es una franja de separación entre dos masas de aire de diferentes temperaturas, y se clasifican como fríos, cálidos, estacionarios y ocluidos, según sus características. La palabra frente tiene origen en el lenguaje militar (como frente de batalla) y se asemeja a una batalla porque el choque entre las dos masas produce

una actividad muy dinámica de tormentas eléctricas, ráfagas de viento y fuertes aguaceros.

Algunos frentes fríos se mueven rápidamente, son fuertes y pueden causar perturbaciones atmosféricas tales como tormentas eléctricas, chubascos, tornados, vientos fuertes y cortas tempestades de nieve durante su paso, acompañadas de condiciones secas a medida que el frente avanza. Dependiendo de la época del año (otoño, invierno o primavera) y de su localización, los frentes fríos pueden presentarse con un periodo de entre 5 a 7 días en promedio (CENAPRED, 2021).

Un frente frío es el límite entre una masa de aire caliente y una masa de aire frío que colisiona y se mueve (figura x). Las masas de aire no se mezclan cuando hablamos de frentes fríos. Las masas de aire frío expulsan las masas de aire caliente y, como el aire frío es más denso, se mueve más rápido y se pega a las superficies, lo que facilita el transporte y el transporte del aire caliente. para ganar altura. Cuando el aire caliente es húmedo e inestable, se enfría y se condensa a medida que asciende, formando grandes nubes que se desarrollan verticalmente con fuerte turbulencia, principalmente se convierten en tormentas con lluvia intensa, granizo, tormentas eléctricas y tornados.

Figura 197. Frentes fríos



Fuente: Faro Universitario (http://www.farouniversitario.radiodelfin.com/node/514)

5.3.8.1. Metodología

Entre las debilidades que encontramos en el municipio de Tulum es la instrumentación meteorológica con la que cuenta, es decir, son pocas las estaciones que obtienes datos de fenómenos climatológicos y se encuentran sistematizados. Tal como se utilizo para el cálculo de otras amenazas en este Atlas, se tomaron datos oficiales de las estaciones cercanas y vinculadas al Servicio Meteorológico Nacional de CONAGUA (tabla 1). El dato para mostrar las áreas vulnerables a tormentas severas para el municipio de Tulum consistió en la recopilación de precipitación extrema en 24 horas por mes por estación (tabla 1).

En primer lugar, se tomaron los datos extremos de precipitación por mes de seis estaciones meteorológicas (tabla 105).

A partir de lo anterior, se graficaron la frecuencia mensual de tormentas severas (gráfica 16) tomando el criterio del SMN de precipitaciones en 24 horas mayores a >50mm. Por la escala manejada, se decidió incluir a partir de 45mm en adelante.

De la misma manera, se muestran el total de tormentas por año (gráfica 17) para un periodo de 12 años. También se logró obtener dos mapas de susceptibilidad a tormentas severas (figuras A y B) para el municipio de Tulum, dividido en dos periodos de análisis 2010-2015 y 2016-2022.

Tabla 105. Precipitación extrema (mm) mensual por estación.

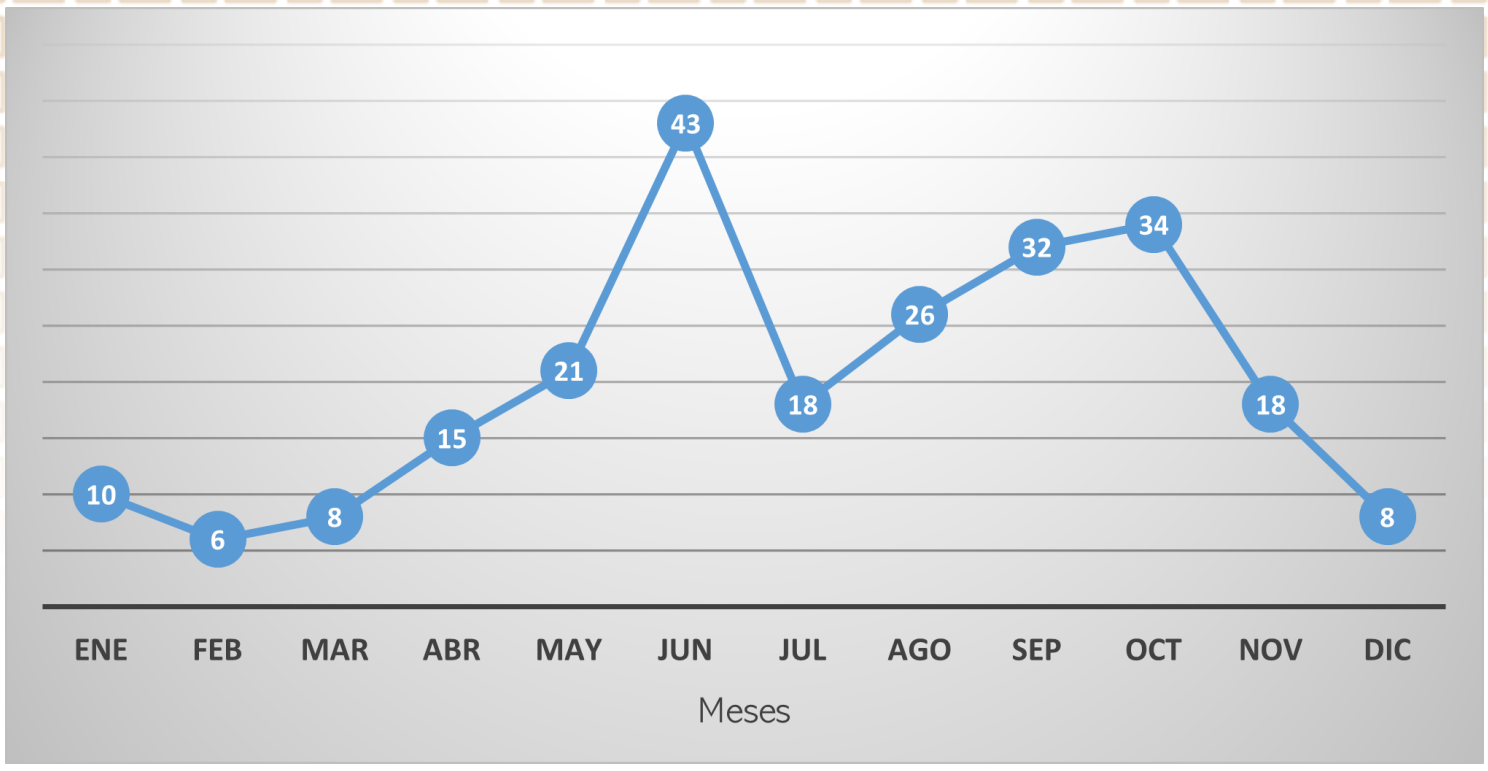
Estación	Año/ mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
23012 Cobá	2010				103.8								
	2011						48.8						
	2012				46.8				46.8				
	2013							56.9		56.8			
	2014			64.8						48.7	190.4	72.4	
	2015						118.6				83.6	65.6	
	2016						48.9						
	2017						58.3	63.8	85.4			60.0	
	2018					75.0	100						
	2019								49.0	62.0	91.0	82.0	
	2020										340.0		72.3
	2021						45.0				64.0		
23163 Playa del Carmen	2010				81.6		78.0	117.0		50.0			
	2011					45.0	75.0	47.0			120.0		
	2012	47.6				50.3	74.0				83.0		
	2013						236.0	55.0	95.6	137.0	46.0	146.8	123.0
	2014	83.5				94.8	56.0				170.0		
	2015						100.0			128.8	103.1	69.8	
	2016								55.0		54.8		
	2017												
	2018												
	2019	81.0	240.4								52.8	99.0	
	2020	47.0				98.0	152.0		50.0		138.5	71.0	49.5
	2021			84.0			84.2				48.2	90.0	
	2022						75.6			61.5		58.0	48.0
23022 Señor	2010	66.9											
	2011										80.4		
	2012					86.9			73.2				
	2013				84.0								
	2014					80.2			49.5	52.2			
	2015						237.3			157.2			
	2016						55.3						
	2017												
	2018												
	2019												
	2020						48.1						
	2021		60.5			110.0	130.0	45.0	82.0	48.0			
23024 Tihosuco	2010						74.1		45.1				
	2011						80.3	80.0		85.0			
	2012				60.5	73.5							
	2013						60.0	73.4		142.0			
	2014					48.5			120.0		198.5		
	2015						159.0						
	2016	56.5					60.0		57.4	82.3	50.6		
	2017						47.8	68.8	76.7	90.4	72.4		54.3
	2018				45.0		97.5						
	2019		47.0				60.0			150.0	80.0		
	2020			78.0		47.3	98.5				53.8	49.0	49.0
	2021	49.2			65.0				100.5	67.0			
	2022			61.5					46.4	48.3			60.5
23025 Tulum	2010					198.0	150.0	140.0		45.0		80.0	
	2011						90.0			49.0	60.0		
	2012		58.0	75.0	48.0	89.0					60.0		
	2013						60.0	45.0	80.0	350.0	60.0		
	2014	60.5		55.5		65.0	75.0			75.5	202.0		
	2015						87.5			65.0	70.0	57.5	
	2016				56.5			49.7	50.0	55.5			
	2017						64.6		65.5	60.5	60.5		
	2018				45.5	80.5	80.5			60.5			
	2019												
	2020	65.5					80.0				100.0	60.5	
	2021								70.8			55.5	
	2022					75.5	45.5				59.9		
31069 Chemax	2010	45.50	59.40			170.70	164.30	343.70	212.50	279.80	57.80		
	2011		66.40	52.80	56.20		218.00	180.40	208.70	294.90	194.80		
	2012				121.20	130.30	138.90	148.70	86.50	126.00	75.30		
	2013				116.50	118.00			61.60	343.00	156.10	248.00	94.40
	2014						362.90	74.70	349.20	236.90	118.62		
	2015												
	2016												
	2017				46.00	127.50	156.00	109.00	187.80	168.10	367.00	52.50	
	2018			81.00	96.50	140.80	267.20	120.00	165.70	169.50		87.00	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por el Área Técnica de la Dirección Local de Quintana Roo, CONAGUA.

5.3.8.2. Resultados

El análisis realizado establece que el peligro por tormentas severas para el municipio de Tulum se ha dado fundamentalmente en primer lugar en el mes de junio, seguido del mes de octubre y posteriormente el mes de septiembre, como los más significativos para este fenómeno. El mes menos significativo ha sido el mes de febrero con solo seis eventos detectados (gráfica 16). Por lo que estos meses y debido a la frecuencia observada, las autoridades a nivel estatal y municipal, así como la población en general deben mantenerse informadas y tomar las medidas necesarias para evitar inundaciones o desastres.

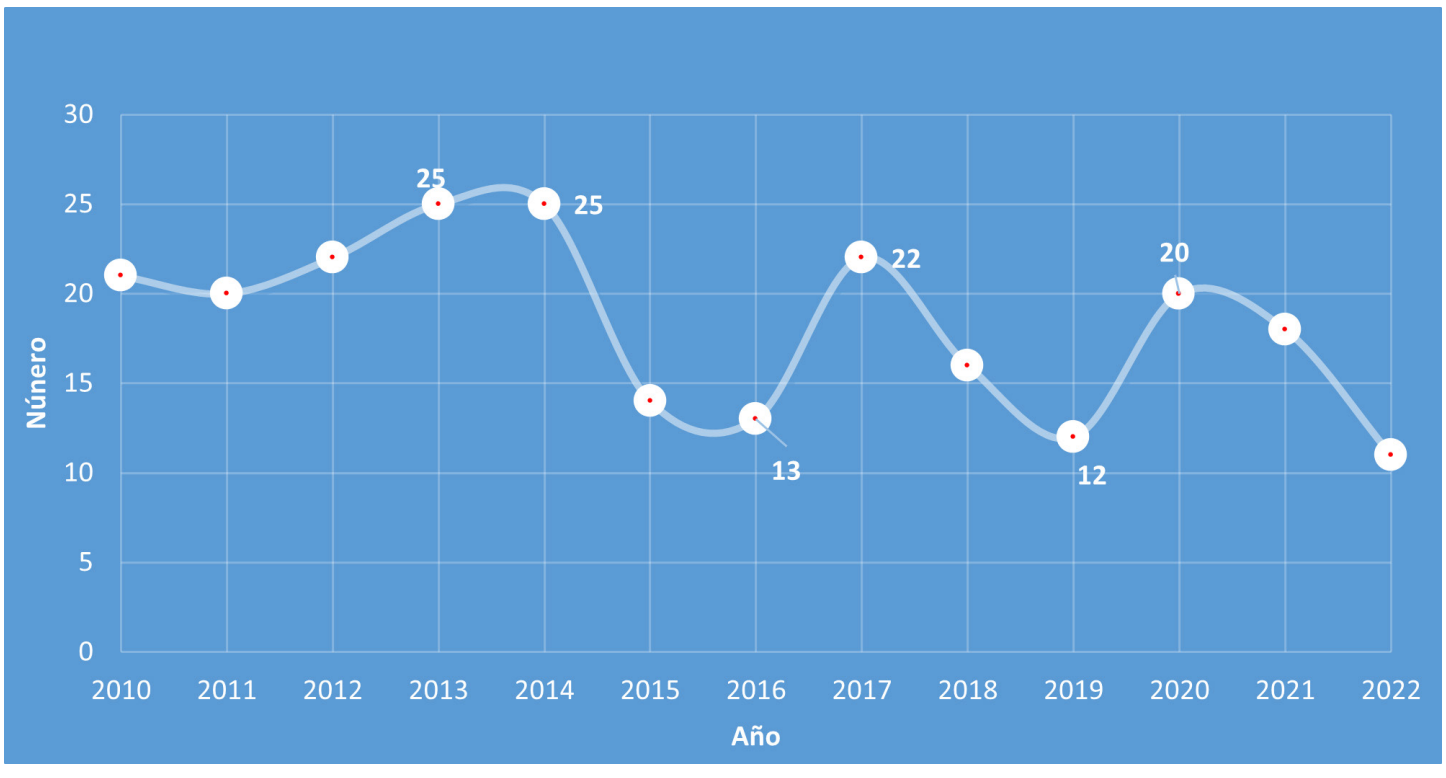
Figura 198. Gráfica de la serie histórica mensual de tormentas severas 2010 a 2022 para Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los periodos en que se presentaron esta acumulación de tormentas fueron 2013 y 2014, con 25 eventos por año (gráfica 17). Este comportamiento, pudo ser el causante de la presencia de más tormentas para los meses de junio a octubre. Los años de menos incidencia fueron 2015, 2016 y 2019, este último fue un año declarado con sequía meteorológica.

Figura 199. Gráfica de la serie histórica total anual de tormentas severas para Tulum (2010 a 2022).



Fuente: Elaboración propia.

5.3.8.3. Mapas de susceptibilidad a tormentas severas

La situación actual del cambio climático requiere más conocimiento sobre las variaciones espaciales y temporales de las precipitaciones extremas las cuales pueden estar asociadas a los ciclones tropicales, a continuación, se presentan los resultados alcanzados para el municipio de Tulum.

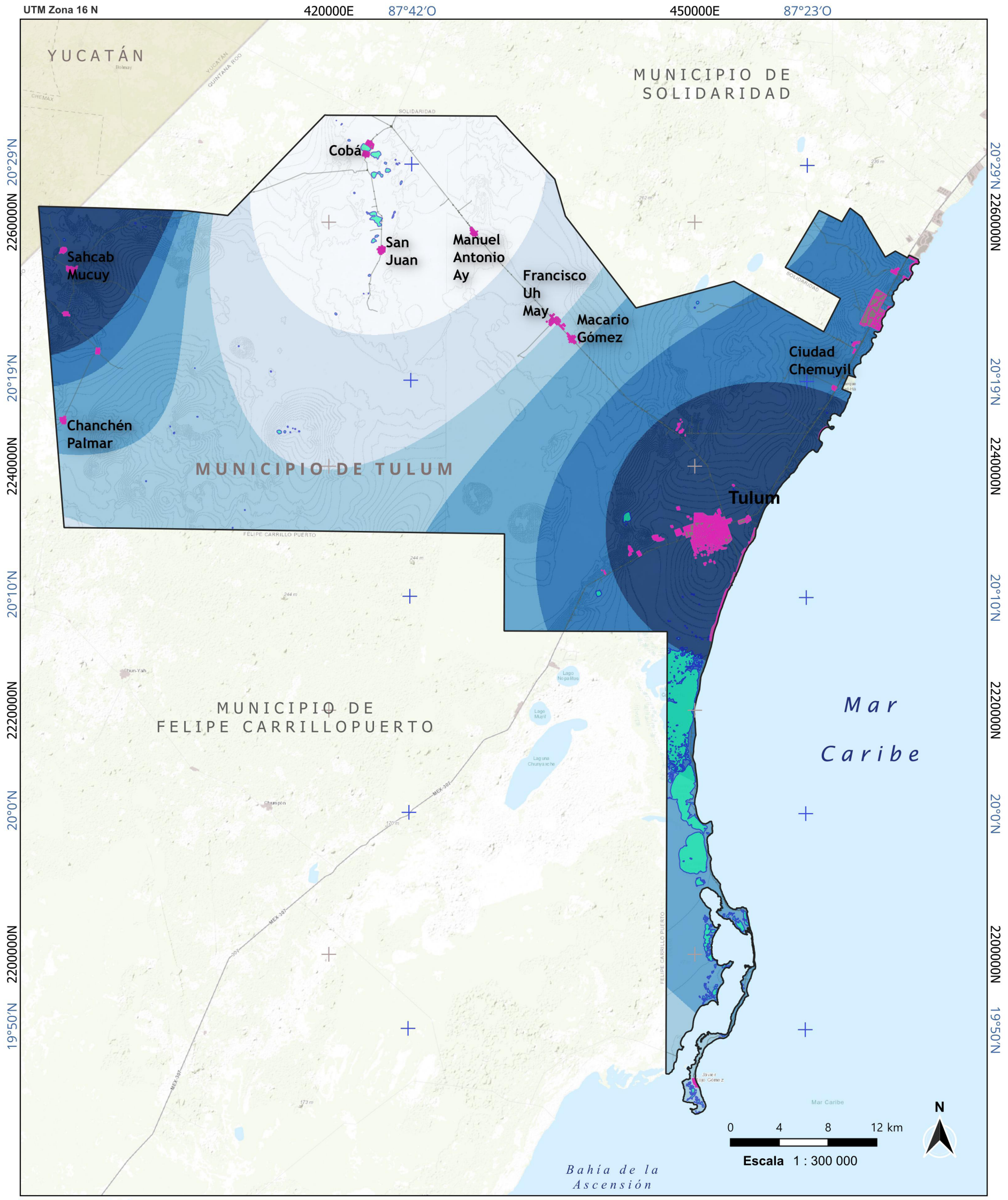
En las figuras 200 y 201 se pueden observar las regiones que a lo largo de estos 12 años de análisis muestran las zonas con mayor concentración de tormentas severas. Estos doce años se dividieron en 2 periodos. El primero de 2010 a 2015, abarcando un periodo de 5 años.

En este mapa (figura 200) las zonas con mayor concentración de tormentas severas, con una acumulación mayor a los casi 2,500 mm, se localizan al Este, en la costa del municipio y donde se encuentra la ciudad de Tulum, y al Oeste donde se ubican las localidades de Sacab Mucuy y Chanchén Primero. Por otra parte, donde la precipitación tiene menor presencia en este periodo de tiempo fue en la región que abarca las localidades de Cobá y San Juan, con una precipitación media a esta escala se encuentran Manuel Antonio Ay y Macario Gómez.

Por otro lado, en la figura 201, el área con mayor concentración de tormentas severas de acuerdo con la precipitación recibida entre 2016 y 2022, es al Oeste del municipio, donde se localizan las comunidades de Sacab Mucuy, Chanchén Primero y Chanchén Palmar. Por su parte, Cobá, San Juan y Tulum la concentración fue menor (menor a 1,300 mm).

Cabe resaltar que se considera que eventos hidrometeorológicos extremos de gran intensidad, se presentan con baja frecuencia temporal y aparente distribución espacial irregular, a su vez estos eventos conllevan peligros naturales de tipo geomorfológico, como procesos de erosión superficial, movimientos de masa, inundaciones fluviales, entre otros.

Figura 200. Distribución de tormentas severas 2010 a 2015



Mapa de susceptibilidad a tormentas severas 2010 - 2015

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Precipitación acumulada (mm)
- > 2483.2
- 2390.1 - 2483.2
- 2224.8 - 2390.1
- 2099.0 - 2224.8
- 1742.9 - 2099.0
- <= 1742.9

- Traza urbana
- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Red vial
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI. Área Técnica de la Dirección Local de Quintana Roo, CONAGUA (2023).Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

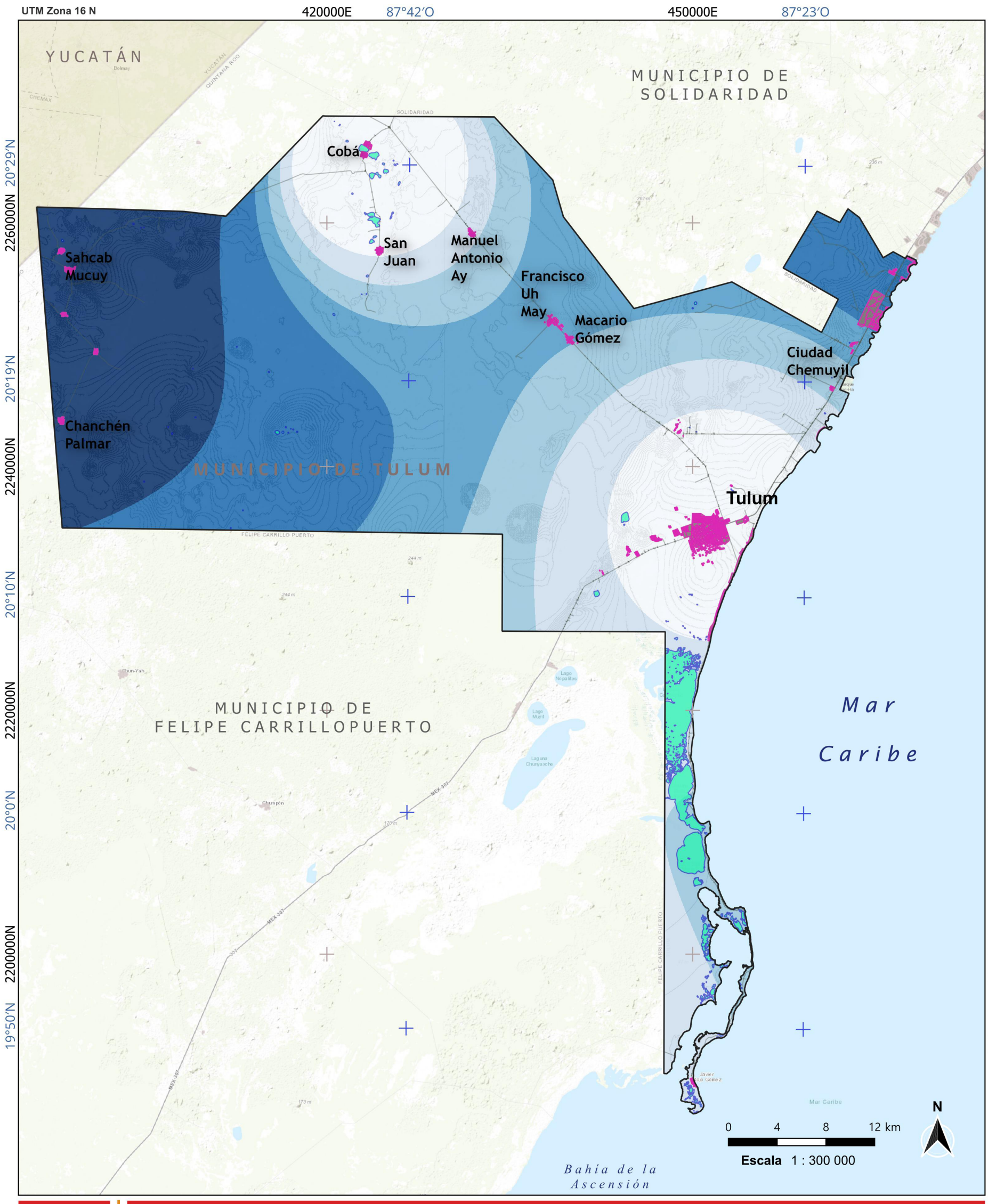
Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

Figura 201. Figura B. **Distribución de tormentas severas 2016 a 2022**



Mapa de susceptibilidad a tormentas severas 2016 - 2022

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Precipitación acumulada (mm)

- > 1511.1
- 1439.2 - 1511.1
- 1411.3 - 1439.2
- 1386.4 - 1411.3
- 1362.9 - 1386.4
- <= 1362.9

- Traza urbana
- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Red vial
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI. Área Técnica de la Dirección Local de Quintana Roo, CONAGUA (2023).Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

5.3.9. Inundaciones por lluvias extremas

Las inundaciones pluviales son eventos en los que el agua de lluvia acumulada supera la capacidad de drenaje de un área determinada. Ocurren cuando se producen fuertes precipitaciones concentradas en una zona, y el suelo no puede absorber o evacuar toda el agua de manera eficiente haciendo que el agua se empiece a acumular. Esto puede deberse a diversos factores, como la impermeabilización del suelo debido a la urbanización, la falta de infraestructuras de drenaje adecuadas o la obstrucción de los sistemas de drenaje existentes.

Por su parte, las inundaciones costeras suceden por la elevación inusual del nivel del mar, provocando que el agua penetre a tierra firme. Puede ser provocada por diversos factores tales como mareas altas, mareas de tormenta o tsunamis.

Finalmente, las inundaciones lacustres suceden cuando los cuerpos de agua interiores (lagos, lagunas) aumentan su nivel significativamente y se desbordan. Pueden ser causadas por fuertes lluvias, deshielos, crecidas en los ríos y arroyos.

En la zona del proyecto, el peligro de que sucedan inundaciones pluviales aumenta durante la temporada de lluvias, que generalmente abarca de mayo a noviembre, ya que la zona experimenta un aumento en las precipitaciones y la posibilidad de fuertes aguaceros. La combinación de lluvias intensas, una capacidad de drenaje natural limitada debido a la topografía plana y la urbanización con una menor capacidad de absorción puede provocar inundaciones localizadas.

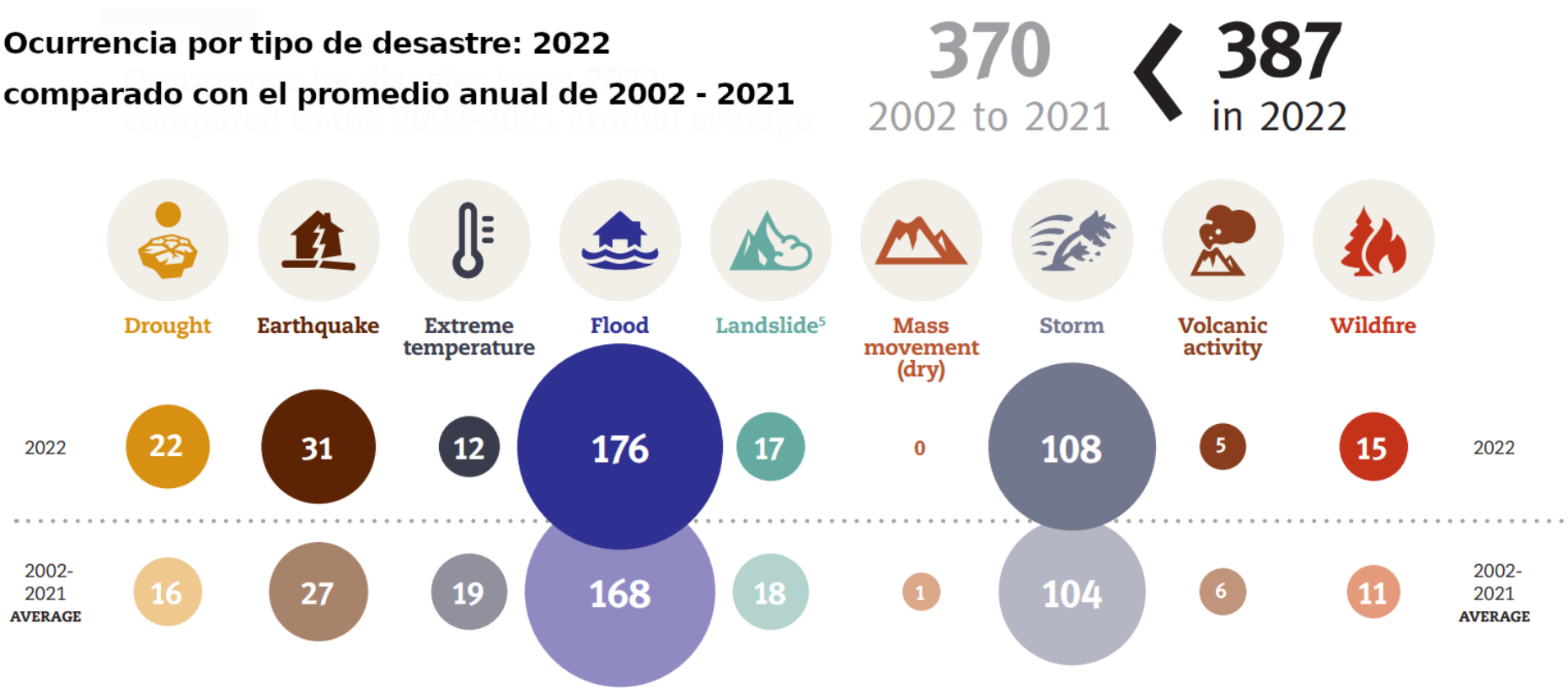
5.3.9.1. Metodología

De acuerdo con el Glosario Internacional de Hidrología (World Meteorological Organization, 2012), la definición de inundación es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”. Las inundaciones pueden originarse por precipitación, oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica, provocando que penetre agua en lugares que normalmente no hay y produciendo, por lo general, afectaciones a la población, agricultura, ganadería e infraestructura.

Las inundaciones por precipitación pluvial se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días hasta evaporarse o infiltrarse en el terreno (Alcocer-Yamanaka et al., 2016).

Los desastres ocasionados por algún fenómeno natural se han cuadruplicado desde 1970 de acuerdo con un informe de la Organización de Naciones Unidas; las inundaciones son quizás el fenómeno más recurrente y de más impacto, particularmente en las zonas costeras a nivel mundial. De acuerdo con el Center for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED), tan solo en 2022 el número de inundaciones importantes (176) casi alcanzó a los que se presentaron las dos décadas anteriores (168). El aumento de este tipo de eventos se observa claramente en la siguiente gráfica en donde las barras de color azul representan el número de inundaciones registradas por año respecto a otros tipos de desastres.

Figura 202. Numero de fenómenos por tipo



Fuente: CRED, 2023

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) espera que el aumento en la temperatura ocasionado por el cambio climático modifique significativamente los patrones tradicionales de precipitación a nivel mundial, afectando actividades que están ligadas a los recursos hídricos tales como la producción alimentaria, el suministro de agua potable y el saneamiento (IPCC, 2014). Otro factor importante que aumenta los niveles de riesgo por inundaciones es el crecimiento urbano que modifica los ecosistemas locales.

Las inundaciones se miden usando dos variables, la primera es la altura de la lámina de agua formada (en mm) y la segunda es la intensidad de la precipitación que relaciona esta altura de la lámina de agua con el tiempo que tardó la lluvia en alcanzarla (mm/hrs). El Servicio Meteorológico Nacional clasifica las lluvias de fuertes a intensas a aquellas que son mayores a 50 mm en un periodo de 24 horas.

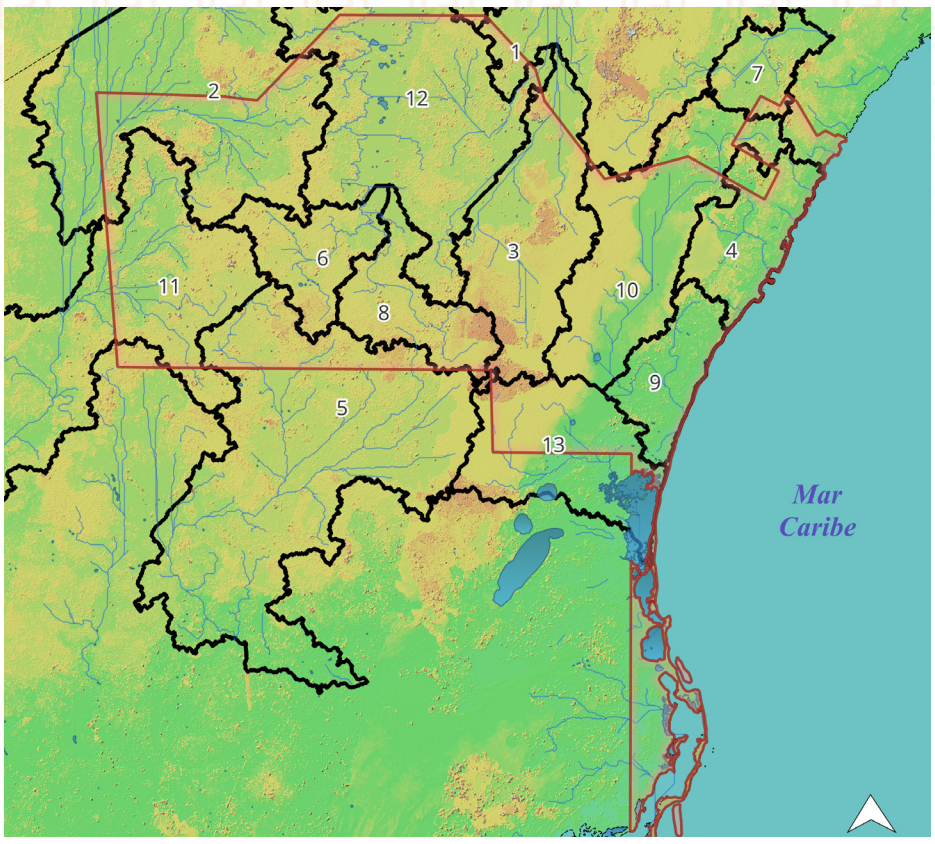
Es común que no se cuente con datos de escurrimiento para determinar la inundación de una cuenca; sin embargo, generalmente se cuenta con los registros de precipitación. Es por ello por lo que se han desarrollado métodos para determinar el escurrimiento en una cuenca mediante sus características y los registros de la precipitación. Las características de la cuenca se pueden estimar a partir de la información topográfica y la precipitación a través de mediciones directas. Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca.
2. Altura total de precipitación.
3. Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
4. Distribución de la lluvia en el tiempo.
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Por otra parte, el concepto de cuenca hidrográfica corresponde a una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio Mijares, 1999).

La configuración de una cuenca hidrográfica está determinada por el parteaguas, línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas y el área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas. La corriente principal de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de esta. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal.

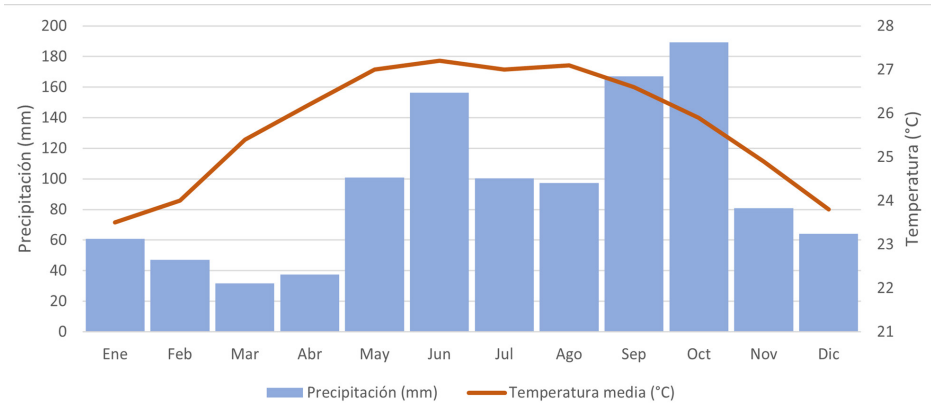
Figura 203. Ilustración 2 Cuenca hidrográfica en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El área del proyecto tiene un régimen pluvial con dos periodos claramente diferenciados, un periodo de lluvias durante los meses de mayo a octubre (con una precipitación media mensual de 120 mm) y una época de secas en los meses noviembre a abril (con una precipitación media mensual de 58 mm).

Figura 204. Climográma de la Estación Meteorológica en Tulum



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de las normales climatológicas del SMN.

La distribución espacial de los acumulados mensuales de lluvia tiene un rango que va de los 29 mm a los 194 mm, siendo los meses de marzo y abril los más secos del año, tal como lo muestra la ilustración anterior. Por su parte, el mes de mayor precipitación es octubre.

Por otra parte, la ubicación del municipio en la región intertropical y particularmente en el Caribe, lo expone a eventos extremos como inundaciones y vientos fuertes (huracanes). En 1997 y 1998 el fenómeno del niño ocasionó grandes cambios en los regímenes de lluvias de manera que grandes extensiones del municipio se vieran afectadas por un periodo de sequía intensa. Desde el 2013 se han declarado emergencias para el municipio por lluvias extremas, siendo los meses octubre y noviembre cuando se presentan.

Tabla 106. Promedios mensuales de temperatura y precipitación

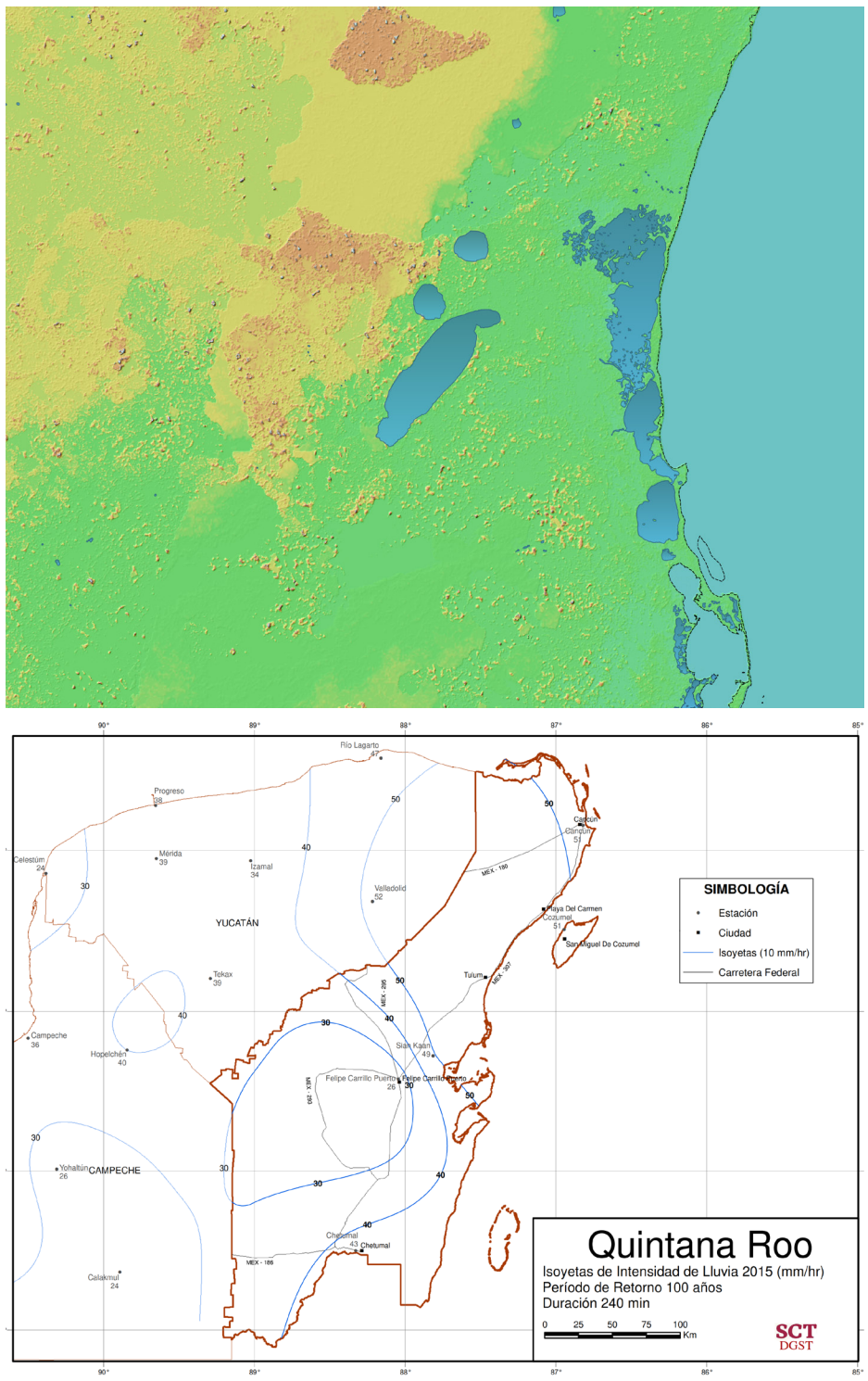
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media	23.5	24	25.4	26.2	27	27.2	27	27.1	26.6	25.9	24.9	23.8
Temperatura máxima	29.3	29.8	30.9	31.4	32.2	32	32.3	32.4	31.8	31.2	30.5	29.4
Temperatura mínima	17.8	18.2	19.8	21.1	21.8	22.5	21.7	21.7	21.4	20.6	19.4	18.2
Precipitaciones	60.7	47	31.7	37.6	100.9	156.5	100.4	97.3	167.2	189.2	80.8	64.2

Fuente: Normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional

5.3.9.2. Memoria de cálculo

Para establecer los escenarios de peligro por inundación pluvial, se utilizó la metodología establecida por CENAPRED (2014) para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas. El objetivo fue generar los mapas de peligro por inundación, donde se observan las superficies inundadas para diferentes periodos de retorno. Los insumos principales fueron el modelo digital de elevaciones provisto por el INEGI en su Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, con resolución espacial de 15 m; y los mapas de isoyetas de intensidad de lluvias para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años generados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Figura 205. Altitud del terreno e Isoyetas - Periodo de retorno

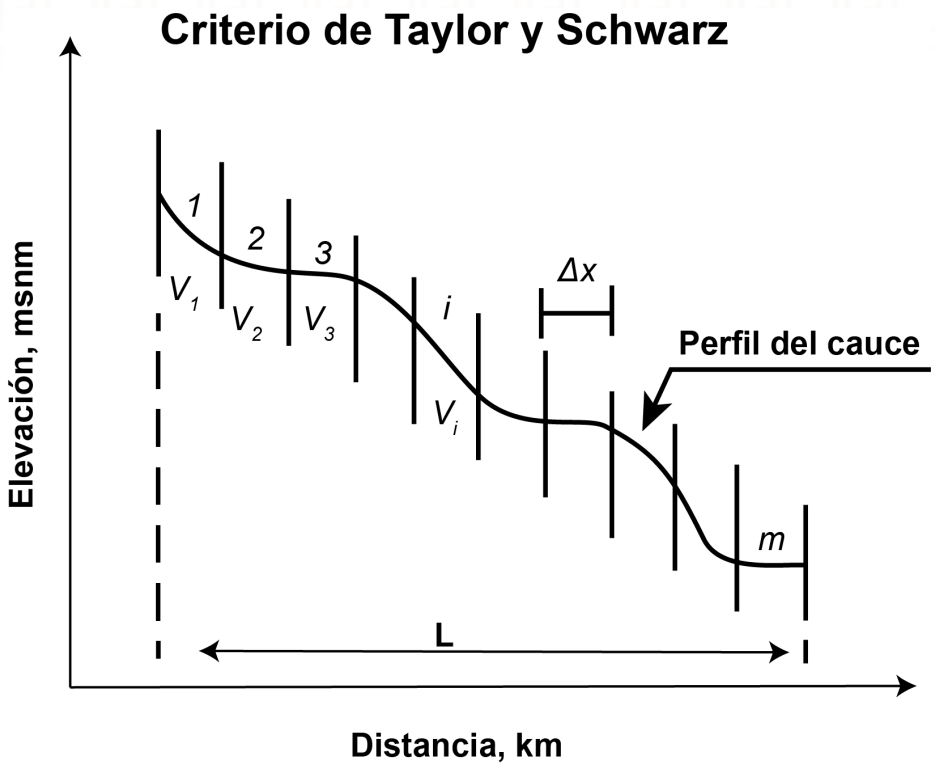


El primer paso fue la obtención de la cuenca hidrográfica y la red de drenaje a partir del modelo digital de elevaciones proporcionado por el INEGI, mismo que fue corregido para evitar la presencia de sumideros, es decir pixeles sin información de altitud del terreno (sinks), lo que representan un error de origen en los datos. Para ello se utilizaron herramientas de análisis hidrológico en sistemas de información geográfica que dieron como resultado la cuenca que se va a modelar (figura 203).

De igual forma, se generó una red de drenaje con 5 órdenes de magnitud, esta red de drenaje representa los cauces virtuales sobre los que viajarán los escurrimientos, es decir, la parte más baja de la cuenca. La cobertura de la cuenca y la red de drenaje excede los límites del área del proyecto ya que se busca que los escurrimientos provenientes de zonas fuera de ella sean adecuadamente representados en el modelo de inundación.

Para modelar los polígonos de inundación se estimaron los caudales de diseño de los flujos principales de cada cuenca, estos son en los que desemboca la red de drenaje de cada cuenca. Para ello fue necesario estimar la pendiente media que es igual al desnivel entre los extremos del cauce principal dividido entre su longitud.

Figura 206. Criterio de Taylor para el cálculo de la pendiente del terreno



Se utilizó la fórmula de Taylor – Schwartz que proponen calcular la pendiente media como un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y recorrido que el cauce principal.

$$S_{media} = \left[\frac{L}{1 + \frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \ldots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}}\right]^2$$

Donde S es la pendiente media del cauce principal; L es la longitud total del cauce principal; S1, S2, …, Sm son las pendientes de cada tramo; y L1, L2, …, Lm son las longitudes de cada tramo.

Por otra parte, habrá que considerar el tiempo de concentración de cada cuenca, este es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, es decir el tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la de la cuenca. Para ello se utilizó el modelo racional. Este modelo toma en cuenta, además del área de la cuenca, la altura o intensidad de la precipitación. Es uno de los más utilizados, particularmente para zonas urbanas.

Utilizando la fórmula de Kirpich se calculó el tiempo de concentración de la cuenca, este valor nos dice en cuantas horas la cuenca estaría aportando agua al punto de salida de la cuenca. Es decir, en cuánto tiempo la cuenca estaría llena y desbordando.

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde L es la longitud del segmento de red, S la pendiente del mismo segmento y tc se expresa en horas.

Para estimar la capacidad de la cuenca se utilizaron los mapas de precipitación máxima con intensidad de una hora y cuatro horas con los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años generados por la SCT y la fórmula de hidrograma unitario, este método fue desarrollado originalmente por Sherman (1932) y está basado en la hipótesis de que la duración total del escurrimiento es la misma para todas las lluvias con duración igual por lo que el volumen total de lluvia es también el mismo (Aparicio Mijares, 1999).

Los mapas de isoyetas de intensidad de lluvia publicados por la SCT reportan períodos de lluvia desde 5 minutos hasta 240 minutos, para la estimación de la cantidad de precipitación que ocurriría en un periodo igual al del tiempo de concentración de la cuenca (tc) se utilizaron los mapas que corresponden a 60 minutos y 240 minutos para aplicar la siguiente fórmula:

hptc: valor de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca en estudio, mm hp4: valor de la precipitación para una duración de 4 horas y un determinado periodo de retorno, mm (SCT) hp1: valor de la precipitación para una duración de 1 hora y un determinado periodo de retorno, mm (SCT) Tc: tiempo de concentración de la cuenca en estudio

Además, es importante saber cuál es el gasto de equilibrio, ya que una vez establecido la capacidad de infiltración de esta no cambia. Se puede calcular el gasto de diseño utilizando la fórmula racional, que es un método empírico de los más utilizados actualmente. Este supone como hipótesis la presencia de una lluvia constante con un gasto que alcanzará el valor máximo cuando toda la cuenca está contribuyendo al mismo tiempo al cauce principal.

Conviene señalar que este método considera para el coeficiente de escurrimiento, el cociente entre la excedencia de precipitación y la precipitación total para un tiempo de concentración dado. La fórmula racional es:

$$hp_{tc} = \frac{hp_{24} - hp_1}{3.1781}(ln(t_c)) + hp_1$$

C: Coeficiente de escurrimiento, representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa. Varía entre 0 y 1. i: intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, mm/h A: Área de la cuenca, km2

Tabla 107. Parámetros de diseño de las cuencas hidrográficas

Cuenca 1					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
405.55	26.43	149181.02	110.45		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	251.65	2.28	231.18
10	80	140	283.62	2.57	260.55
25	90	180	395.43	3.58	363.27
50	100	200	439.36	3.98	403.63
100	105	200	427.39	3.87	392.63
Cuenca 2					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
631.62	24.40	334543.20	199.47		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	275.10	1.38	217.95
10	80	140	309.20	1.55	244.97
25	90	180	433.80	2.17	343.68
50	100	200	482.00	2.42	381.87
100	105	200	467.90	2.35	370.70
Cuenca 3					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
239.06	29.93	87789.66	77.02		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	237.35	3.08	184.32
10	70	140	289.35	3.76	224.70
25	80	180	393.36	5.11	305.47
50	90	200	434.69	5.64	337.57
100	90	200	434.69	5.64	337.57
Cuenca 4					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
123.77	20.34	29653.39	28.78		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	198.29	6.89	213.37
10	70	140	239.64	8.33	257.86
25	80	180	322.35	11.20	346.85
50	90	200	356.58	12.39	383.69
100	90	200	356.58	12.39	383.69

Cuenca 5					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
624.99	56.00	238566.48	211.69		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	277.46	1.31	204.96
10	70	140	340.40	1.61	251.45
25	80	180	466.29	2.20	344.44
50	90	200	514.92	2.43	380.36
100	90	200	514.92	2.43	380.36

Cuenca 6					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
111.71	22.00	64630.06	54.04		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	223.29	4.13	115.48
10	80	140	252.68	4.68	130.67
25	90	180	349.02	6.46	180.50
50	100	200	387.80	7.18	200.55
100	105	200	378.41	7.00	195.70

Cuenca 7					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
69.98	24.27	25643.48	27.55		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	196.55	7.14	124.94
10	70	140	237.43	8.62	150.92
25	80	180	319.19	11.59	202.89
50	90	200	353.11	12.82	224.45
100	90	200	353.11	12.82	224.45

Cuenca 8					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
119.13	30.78	64883.72	61.69		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	140	288.01	4.67	139.17
10	60	170	387.08	6.27	187.04
25	80	180	377.34	6.12	182.33
50	90	200	417.08	6.76	201.53
100	90	200	417.08	6.76	201.53

Cuenca 9					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
97.29	15.04	32961.82	27.79		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	196.91	7.08	172.45
10	70	160	285.85	10.28	250.35
25	80	180	319.83	11.51	280.11
50	90	200	353.82	12.73	309.87
100	90	200	353.82	12.73	309.87

Cuenca 10					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
272.70	24.16	79024.05	65.41		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	230.86	3.53	240.83
10	70	140	281.10	4.30	293.23
25	80	180	381.57	5.83	398.04
50	90	200	421.72	6.45	439.93
100	90	200	421.72	6.45	439.93

Cuenca 11					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
411.36	25.24	159673.52	114.34		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	253.02	2.21	227.76
10	70	140	309.30	2.71	278.42
25	80	180	421.86	3.69	379.74
50	90	200	466.04	4.08	419.52
100	90	200	466.04	4.08	419.52

Cuenca 12					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
453.03	25.35	202247.91	137.38		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	260.30	1.89	214.77
10	80	140	293.06	2.13	241.80
25	90	180	409.59	2.98	337.95
50	100	200	455.10	3.31	375.50
100	105	200	442.34	3.22	364.97

Cuenca 13					
Área (km2)	Pendiente	Longitud (mts)	Tc		
205.31	48.00	68461.54	76.29		
Periodo de retorno	hp_1hr	hp_4hr	hp_tc	i	Qp
5	65	120	236.97	3.11	159.57
10	80	160	330.13	4.33	222.30
25	80	180	392.67	5.15	264.41
50	90	200	433.93	5.69	292.20
100	90	200	433.93	5.69	292.20

Fuente: Elaboración propia

Con estas variables calculadas, la red de drenaje de cada cuenca y la topografía del terreno (MDE) se estimaron los escenarios de peligro basados en el modelo hidráulico propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (Brunner et al., 2020) en su software HecRAS, que es recomendado por el CENAPRED.

5.3.9.3. Resultado del análisis

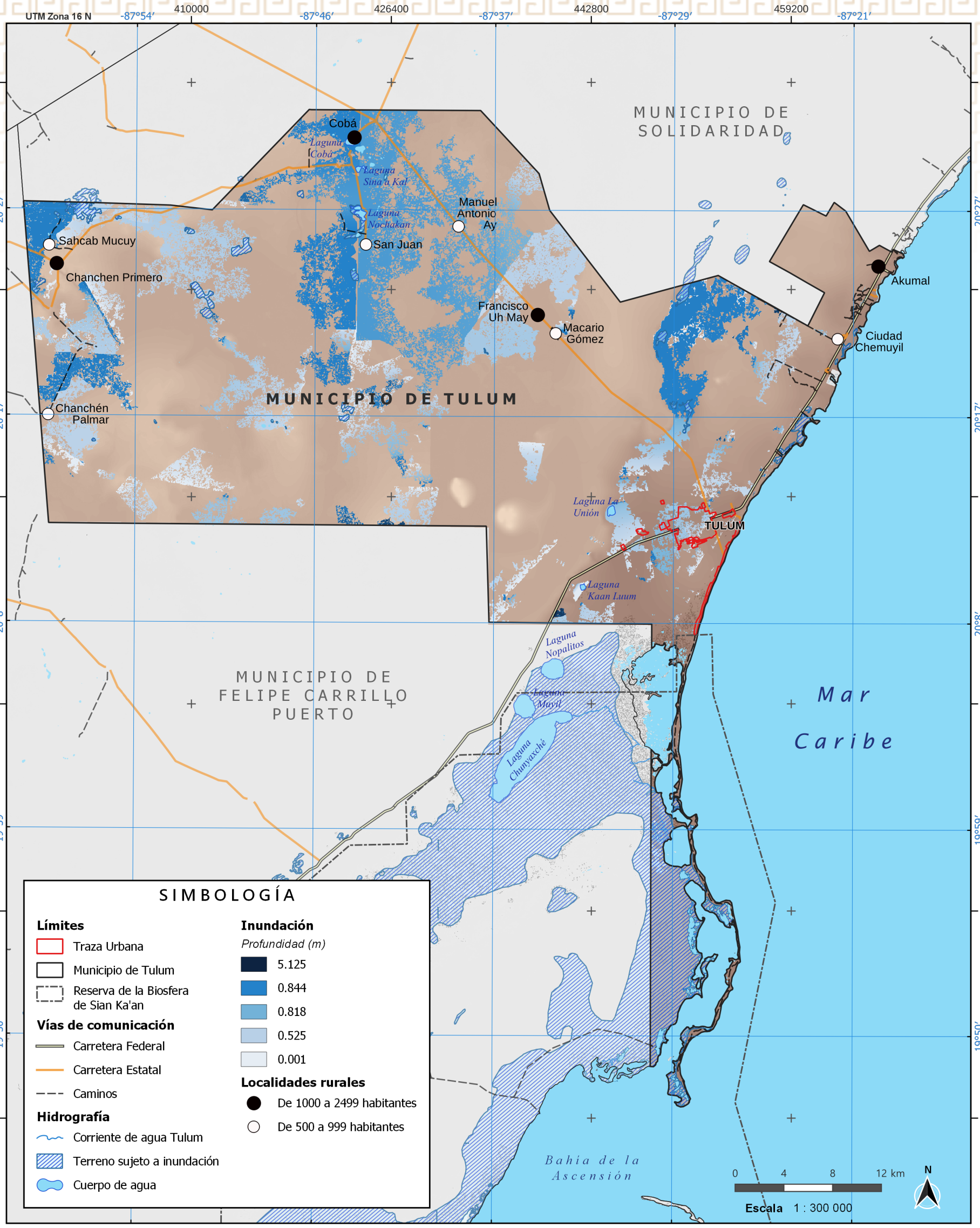
Los mapas de las zonas suceptibles a inundación para los 5 periodos de retorno calculados (5, 10, 25, 50 y 100 años) se muestran tres grandes zonas con algún nivel de peligro. Una de ellas se encuentra al oeste del límite municipal, colindante con el estado de Yucatán, otra se encuentra en la parte central del municipio, desde la comunidad de Cobá hacia el sur y la última de ellas se encuentra al este del límite municipal, cercana a la costa, inicia al norte en una zona de humedales y continua hacia el sur hasta la laguna La Unión y la mancha urbana de la ciudad de Tulum.

En estos mapas (figuras 207 a la 216) se observa que las regiones de mayor peligro por inundación se encuentran fuera de las zonas habitadas excepto en las localidades de Cobá y San Juán (al sur de la anterior).

Para la ciudad de Tulum, se puede observar que al centro de la localidad y al norte de la carretera federal (Av. Tulum) se encuentran la mayor parte de las zonas de inundación. Particularmente en la Colonia Tumben Kaa.

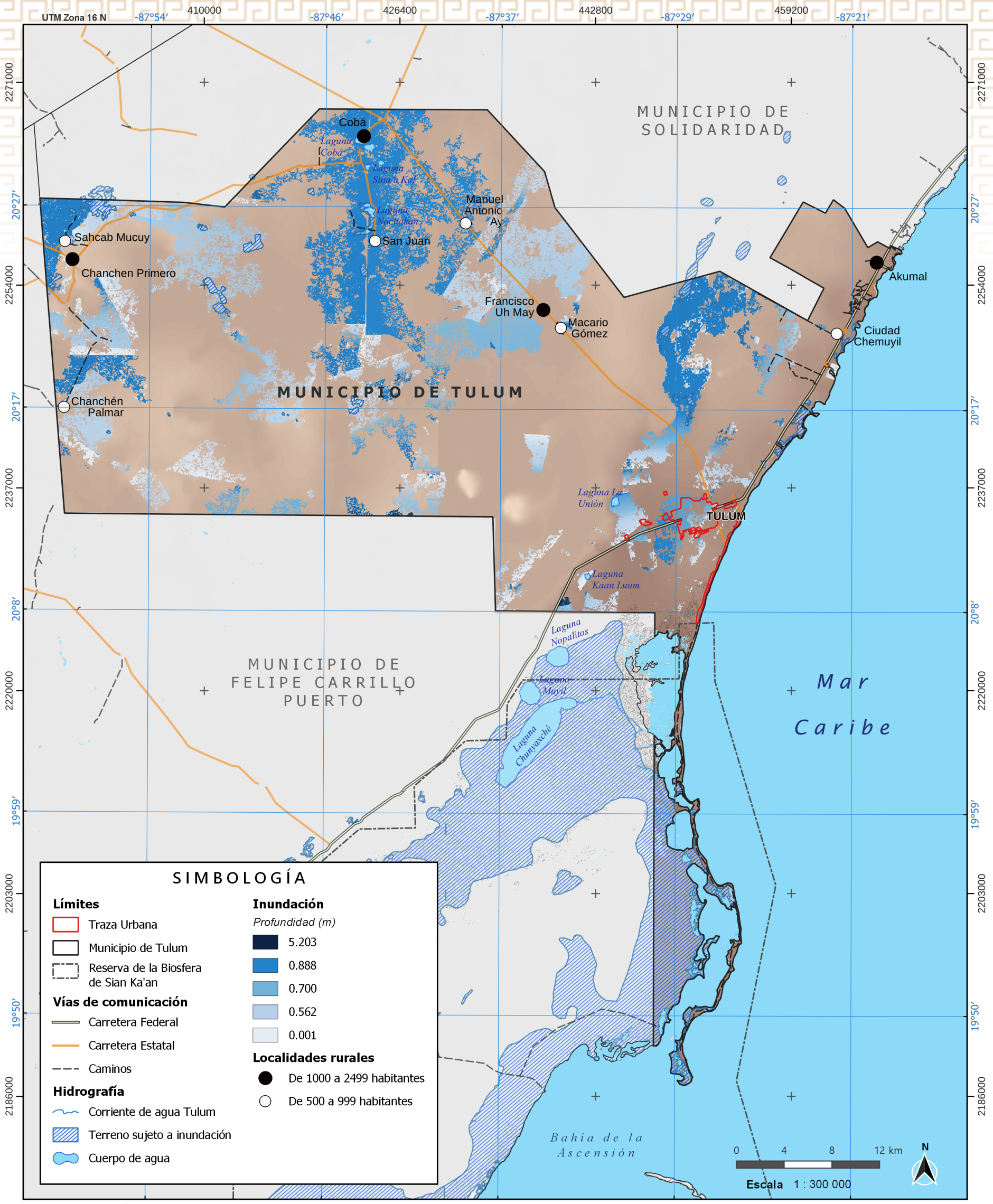
5.3.9.4. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados

Figura 207. Mapa de áreas de inundación para un perioro de retorno de 5 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 208. Mapa de áreas de inundación para un perioro de retorno de 10 años



MAPA DE INUNDACIÓN - PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

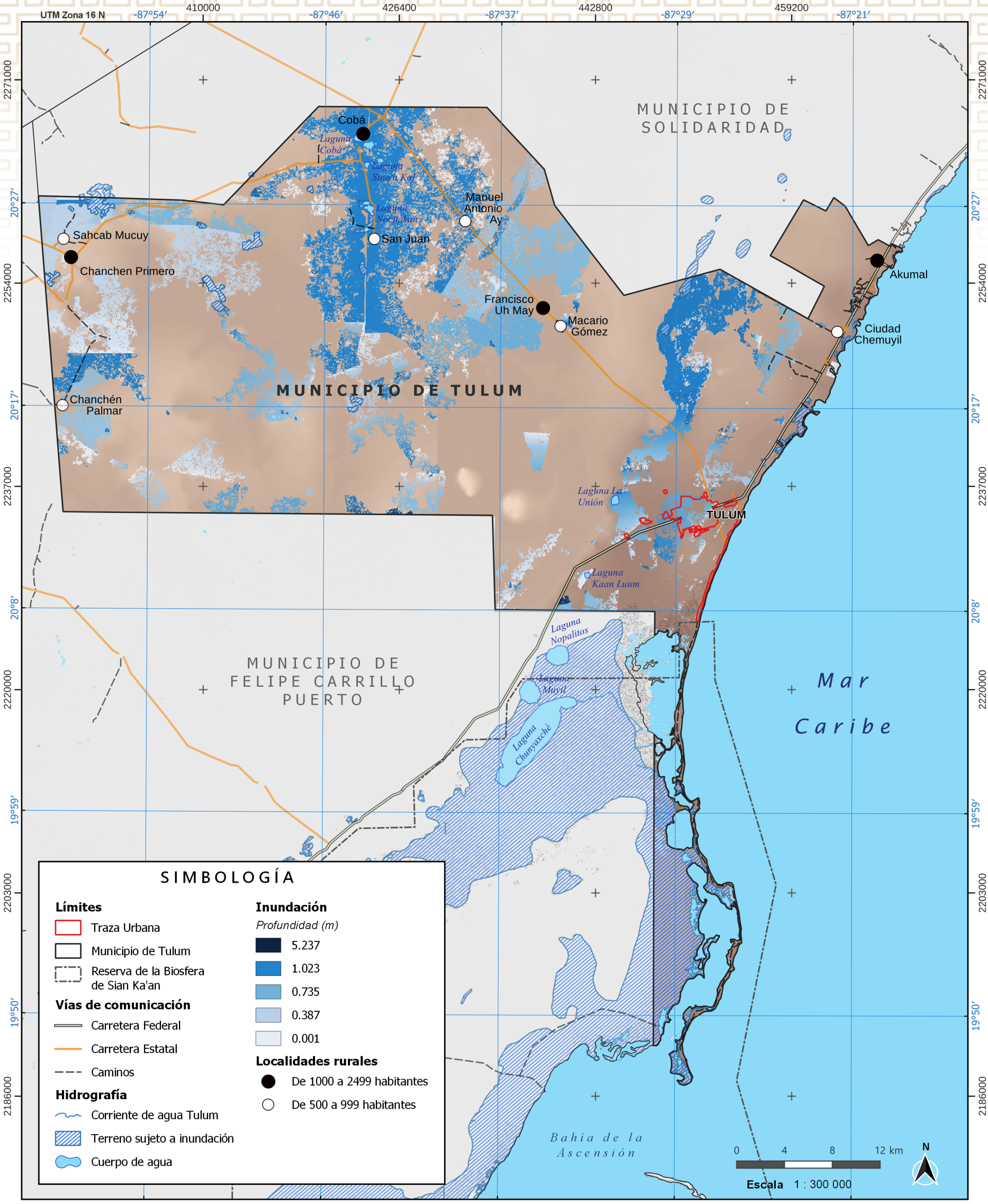
Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

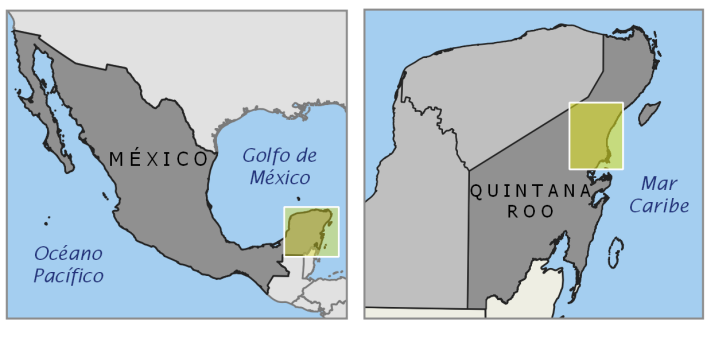
Fuente:
Estadísticas de incendios forestales 2015 -2022, Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF, 2022).
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Figura 209. Mapa de áreas de inundación para un perioro de retorno de 25 años



MAPA DE INUNDACIÓN - PERIODO DE RETORNO 25 AÑOS



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:

Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

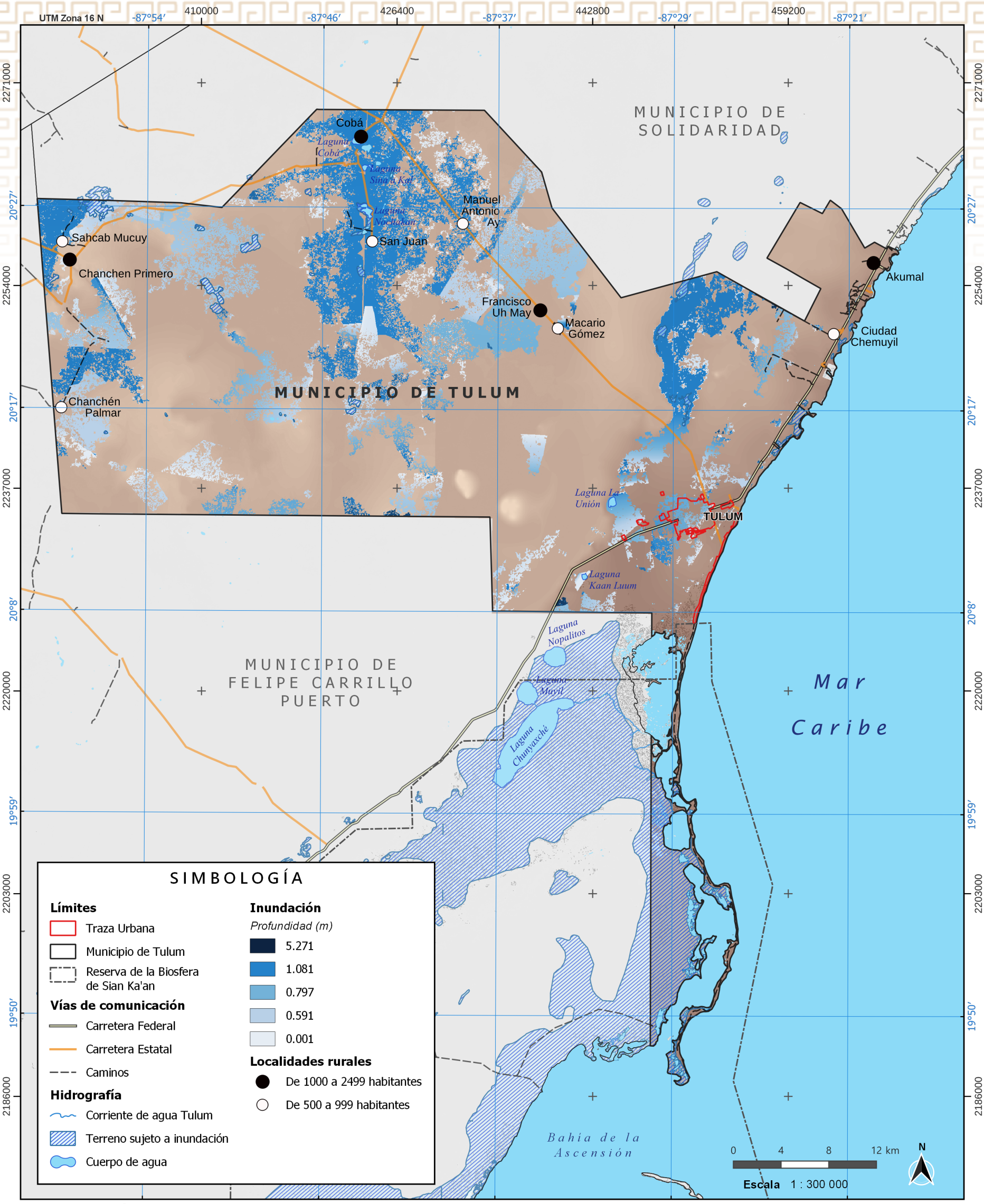
Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

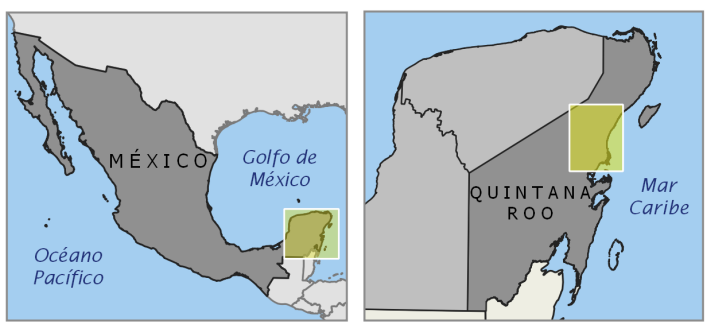
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Figura 210. Mapa de áreas de inundación para un perioro de retorno de 50 años



MAPA DE INUNDACIÓN - PERIODO DE RETORNO 50 AÑOS



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

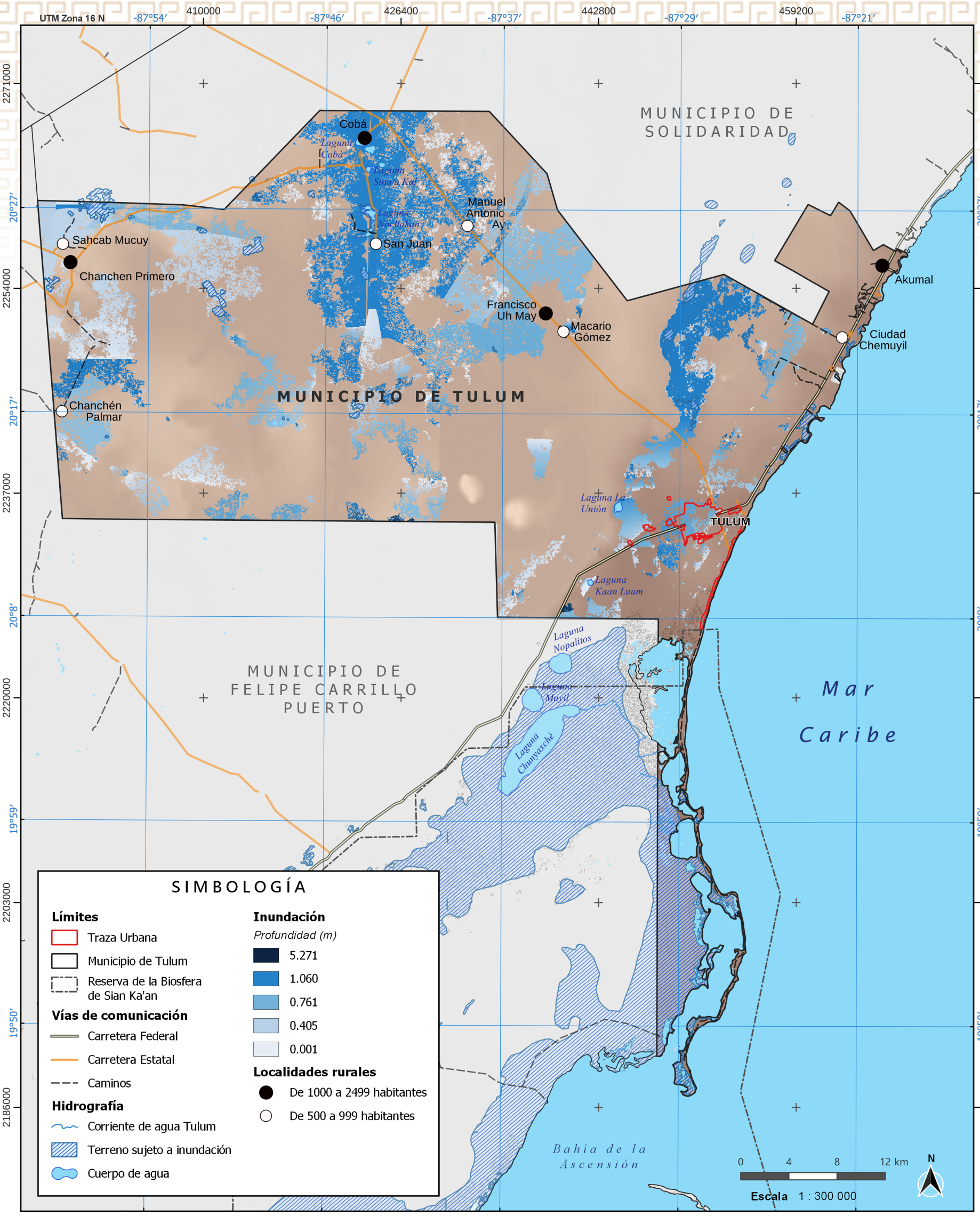
Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

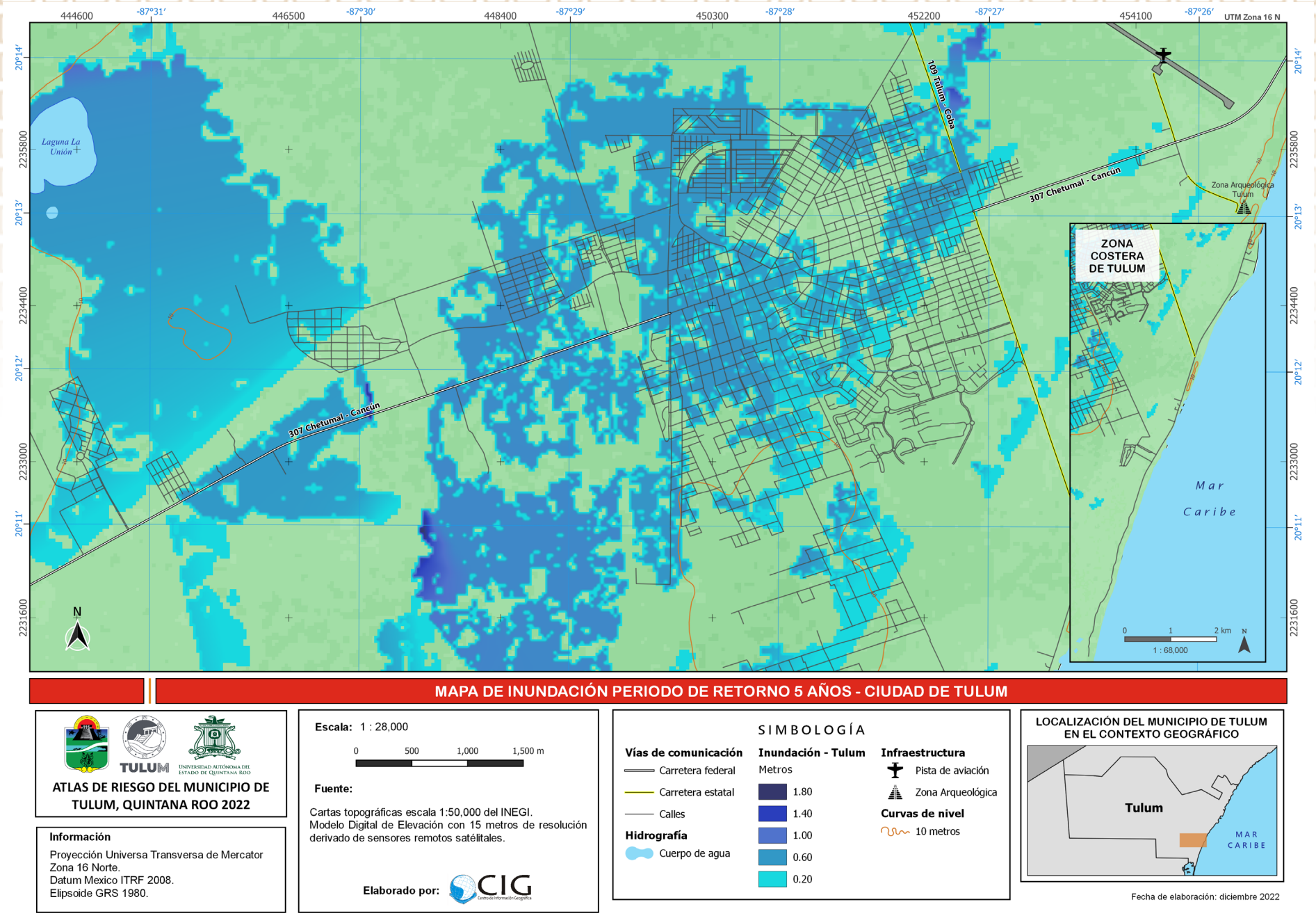
Fuente: Elaboración propia

Figura 211. Mapa de áreas de inundación para un perioro de retorno de 100 años



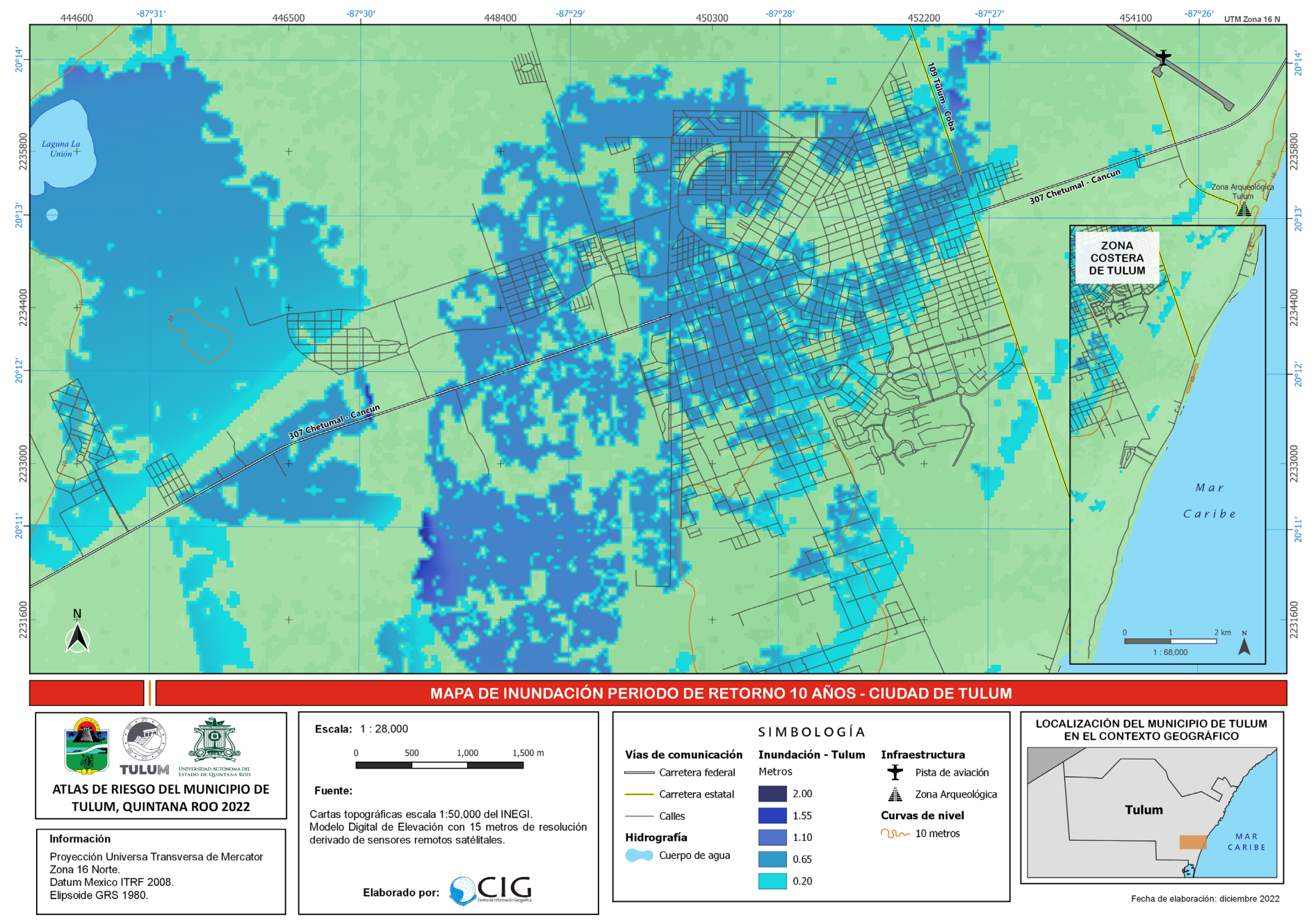
Fuente: Elaboración propia

Figura 212. Mapa de áreas de inundación en la ciudad deTulum para un perioro de retorno de 5 años



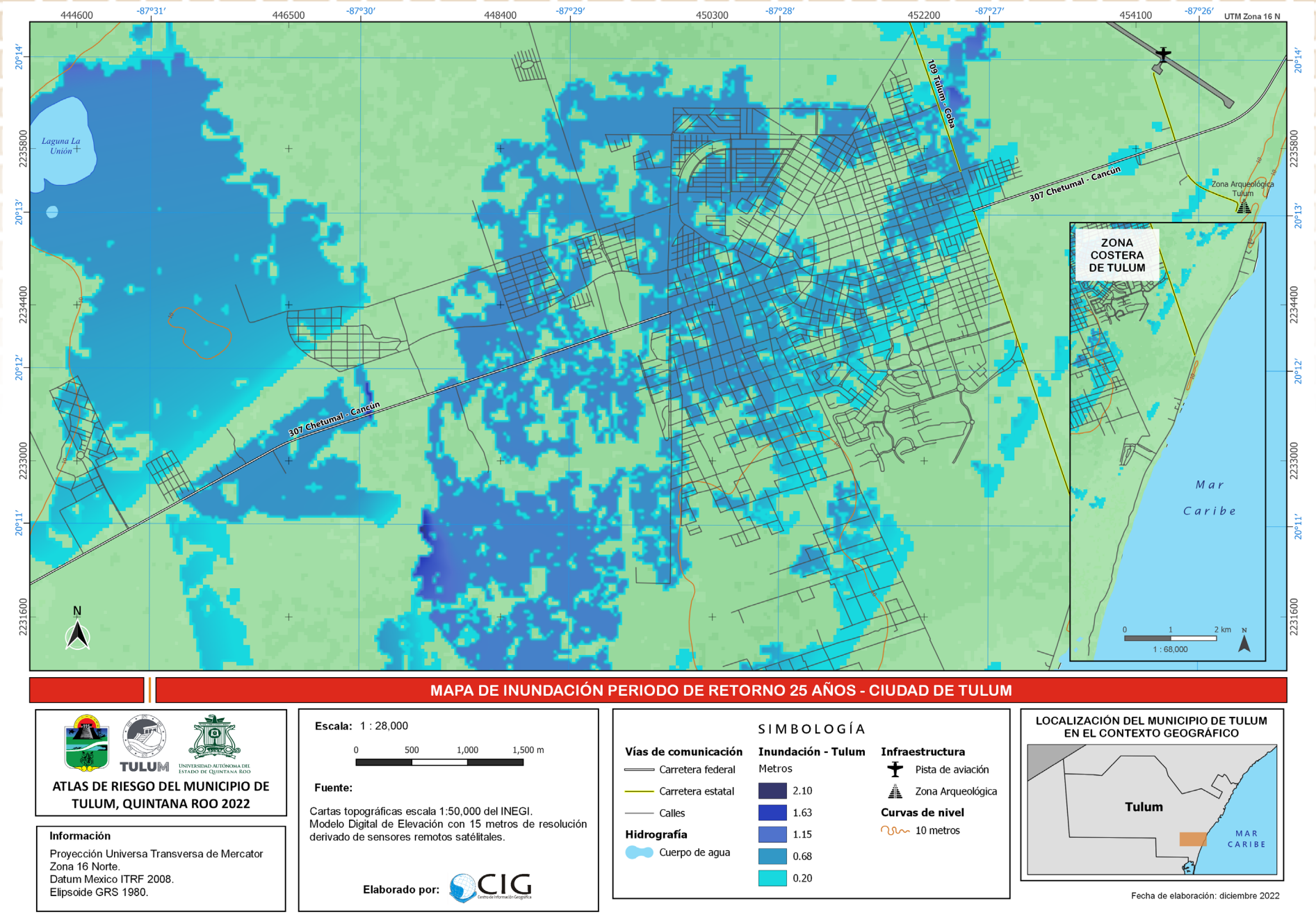
Fuente: Elaboración propia

Figura 213. Mapa de áreas de inundación en la ciudad deTulum para un perioro de retorno de 10 años



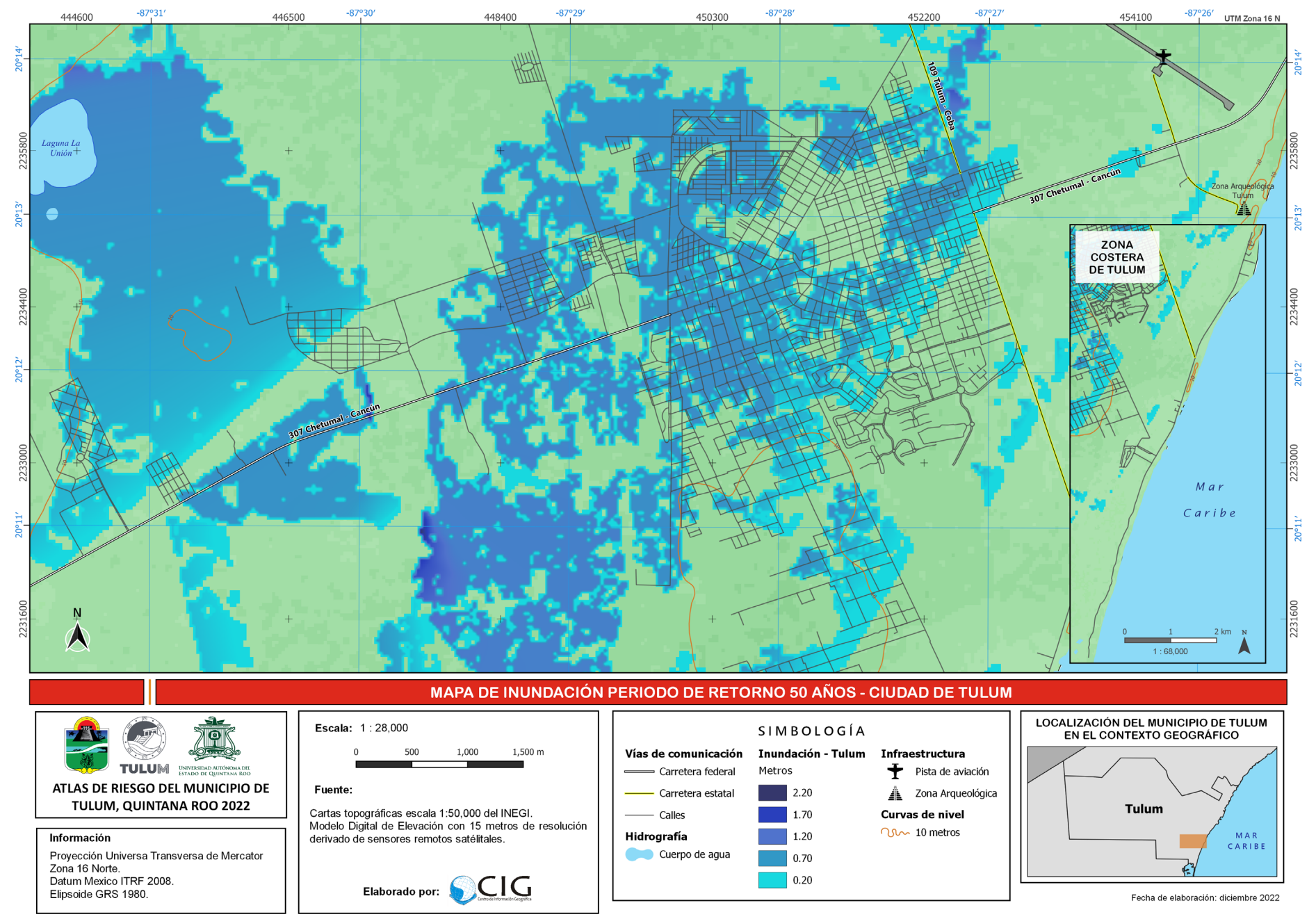
Fuente: Elaboración propia

Figura 214. Mapa de áreas de inundación en la ciudad deTulum para un perioro de retorno de 25 años



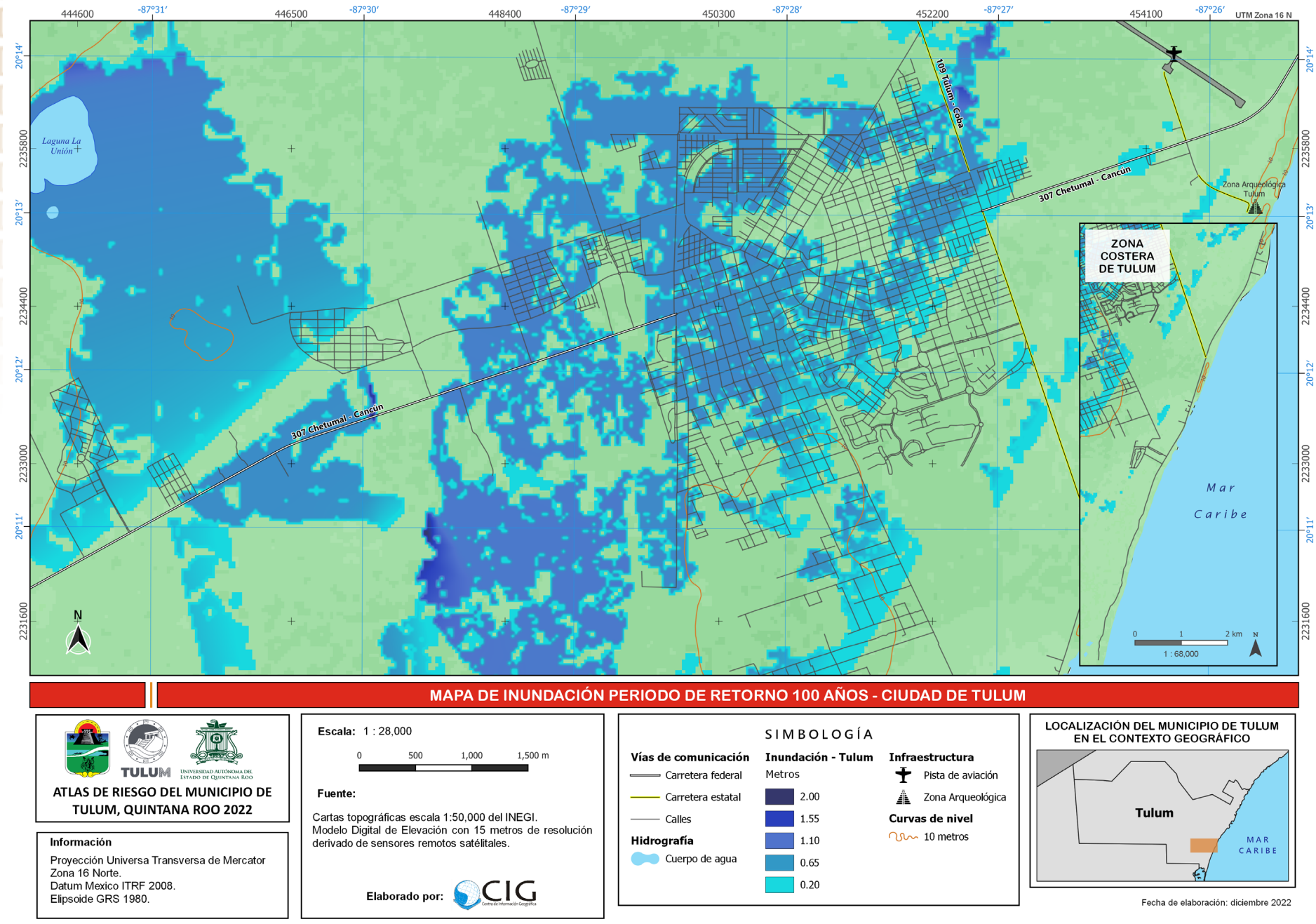
Fuente: Elaboración propia

Figura 215. Mapa de áreas de inundación en la ciudad deTulum para un perioro de retorno de 50 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 216. Mapa de áreas de inundación en la ciudad deTulum para un perioro de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia

5.4. Fenómenos químicos tecnológicos

5.4.1. Almacenamiento de sustancias peligrosas

El almacenamiento consiste en el conjunto de espacios y recipientes usados para contener productos químicos, incluyendo los diques de contención, las calles o pasillos intermedios de circulación y separación, las tuberías de conexión, y las zonas e instalaciones de carga, descarga y traslado anexas, y otras instalaciones necesarias para el almacenamiento, siempre que sean exclusivas del mismo.

El almacenamiento de sustancias químicas peligrosas es una actividad que se realiza comúnmente en la industria de diversos sectores económicos; los incidentes que ocurren por esta actividad traen consigo consecuencias de alto impacto negativo a diferentes elementos del entorno tales como: la salud de las personas, el ambiente, infraestructura privada y pública y la actividad comercial y económica; estos efectos pueden presentarse de forma inmediata o a lo largo plazo, incluso puede interrumpir servicios básicos como el suministro de agua y energía eléctrica que de forma indirecta repercute en la calidad de vida de las personas e incluso en la salud.

Los accidentes en el almacenamiento de sustancias químicas pueden presentarse por diversas causas, entre las que se incluyen: fallas operativas en los procesos industriales, fallas mecánicas en los equipos, errores humanos, pérdida de servicios, fenómenos naturales (sismos, huracanes, inundación, erupción volcánica, etcétera.), desviaciones en los parámetros del proceso y causas premeditadas.

El almacenamiento de sustancias químicas peligrosas en nuestro país debe hacerse conforme a la legislación correspondiente; Las sustancias peligrosas en México se clasifican para su almacenamiento de acuerdo con la NORMA Oficial Mexicana NOM-018-STPS-2015, "Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo". En dicha norma se encuentran los criterios de clasificación para las sustancias según sean tóxicas, inflamables y reactivas, y por grado de peligro.

Este sistema establece dos opciones de identificación, una en forma de rombo y otra de rectángulo, el modelo rombo coincide completamente con el sistema de identificación de materiales peligrosos establecido por la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (National Fire Protection Association, NFPA) en el estándar NFPA 704 (figura 217), mientras que el modelo rectángulo concuerda con el Sistema de Identificación de Materiales Peligrosos HMIS por sus siglas en inglés (Hazardous Materials Identification System) desarrollado por la Asociación Nacional de Pinturas y Recubrimientos, ambos sistemas fueron desarrollados en los Estados Unidos de América.

Figura 217. Sistema estándar de NFPA 704 para la identificación de los peligros de los materiales para la respuesta de emergencia.



Fuente: Eduardo colin, CC0, via Wikimedia Commons

De acuerdo con las características de peligrosidad de sustancias químicas, las sustancias que representan mayor peligro en Quintana Roo son:

- Diésel
- Turbosina
- Gasolina
- Gas LP
- Dióxido de carbono
- Ácido sulfúrico
- Amoniaco
- Cloro

Si bien las sustancias químicas se encuentran disponibles a la población y se exponen cotidianamente a ellas, representan riesgo sólo para las personas que tienen contacto directo y no para la comunidad en general. Sin embargo, existen actividades industriales y comerciales donde se manejan y almacenan grandes cantidades de sustancias peligrosas cuya liberación o derrame generará afectación que supere las instalaciones y amenace a la población, infraestructura, equipamiento y demás actividades cercanas. Razón por la cual, estas instalaciones resultan prioritarias en materia de prevención de desastres y protección civil.

En el caso particular del municipio de Tulum se realizó el análisis de riesgo para las estaciones de distribución y almacenamiento de Gas LP y gasolineras, ya que son las que se encuentran dentro de la ciudad considerándose peligrosas para la salud de la población.

Gas licuado de petróleo

El gas licuado del petróleo o gas L.P. es un gas inflamable. Adicionalmente a las posibilidades de explosión e incendio que provocan quemaduras y otros efectos adversos a la salud, la salpicadura de una fuga de gas licuado provoca congelamiento momentáneo, seguido de hinchazón y daño ocular. El contacto con la piel genera quemaduras frías. En altas concentraciones (más de 1000 ppm), el gas licuado es un asfixiante simple, debido a que diluye el oxígeno disponible para respirar. Los efectos de una exposición prolongada pueden incluir: dolor de cabeza, náusea, vómito, tos, signos de depresión en el sistema nervioso central, dificultad al respirar, mareos, somnolencia y desorientación. En casos extremos pueden presentarse convulsiones, inconsciencia, incluso la muerte como resultado de la asfixia. En fase líquida puede ocasionar quemaduras por congelamiento.

En la ciudad de Tulum las instalaciones de gas LP en cantidades suficientes para considerarse peligrosas son las plantas que lo distribuyen, las cuales se encuentran en la parte norte de la ciudad sobre la Av. Coba rodeadas de establecimientos comerciales. En la siguiente tabla se describen las propiedades fisicoquímicas y los posibles riesgos.

Tabla 108. Propiedades fisicoquímicas del Gas LP.

Peso Molecular	49 g en promedio, debido a que es una mezcla, no tiene un peso molecular definido depende de la composición.
Estado físico	Gas incoloro e inodoro, se le añaden pequeñas cantidades de mercaptano para darle olor característico.
Presión de vapor	760 mm Hg a 25°C
Solubilidad en agua	Insoluble
Grado de riesgo	Salud 1, Inflamabilidad 4, Reactividad 0
IPVS	2000 ppm
Límite máximo permisible de exposición	1800 mg/m3 (TWA)
Reactividad	Es incompatible y puede reaccionar con sustancias oxidantes fuertes.
Riesgo de fuego	Es extremadamente inflamable, se prende fácilmente por calor, chispa o flama, forma mezclas explosivas con el aire. Los vapores son más pesados que el aire, No se debe extinguir el fuego de gas LP, al menos que la fuga se halla controlado. Cuando se quema forma vapores tóxicos y/o irritantes.
Riesgo a la salud	Las impurezas oleofínicas pueden causar narcosis. No es tóxico a concentraciones menores al límite inferior de explosividad. Los vapores pueden causar mareo. El contacto con el gas o el gas licuado pude causar quemaduras, daño severo y congelamiento. Los vapores pueden causar asfixia por desplazamiento de oxígeno.

Fuente: Base de datos de materiales peligrosos de NOAA (https://cameochemicals.noaa.gov/).

5.4.1.1. Metodología

Se empleó el software Aloha (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) versión 5.4.7, el cual está diseñado para el modelado de peligros químicos, para generar zonas de afectación como consecuencia de una nube tóxica, incendio o explosión. Se emplean dos modelos de dispersión; el modelo Gaussiano para gases ligeros y Delgados para gases densos.

Cabe resaltar que, en la aplicación de los modelos, un factor importante son las condiciones meteorológicas, como es la dirección, la velocidad del viento, la nubosidad y la humedad. Por lo que, el área de peligro estará determinada principalmente por estas variables, siendo esta trayectoria a la que será aplicada los intervalos correspondientes de acuerdo al tipo de sustancia.

El resultado del modelo es presentado por los Niveles de Exposición Aguda (AEGL por sus siglas en inglés), que representan el umbral límite de exposición para la población:

- **AEGL 1:** es la concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todos los individuos podrían estar expuestos, durante una hora y pueden desarrollar o experimentar efectos graves a la salud.
- **AEGL 2:** es la concentración máxima por debajo de la cual casi todos los individuos podrían estar expuestos durante una hora donde pueden presentar efectos significativos a la salud.
- **AEGL 3:** es la concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todos los individuos podrían estar expuestos hasta una hora, sin experimentar efectos adversos a la salud, más que leves o transitorios sin percibir un olor claramente definido.

Calculo de peligro de almacenamiento de Gas LP

En la ciudad de Tulum se localizaron 4 estaciones de servicios de distribución de gas LP, que se describen a continuación:

Tabla 109. Localización de las estaciones de servicio de gas LP.

Nombre	Dirección	Latitud	Longitud	Almacenamiento
Turbo Gas	Av. Cobá esquina Okot	20°13’12.47’’	87°27’17.65’’	5,000 litros
Gas Tomza Cobá	Calle Bubul-Ek esquina Av. Cobá	20°13’1.43’’	87°27’17.35’’	5,000 litros
Tomza Gas	Calle Yaxchen, MZA 862 LT.04	20°12’22.25’’	87°30’7.12’’	75,050 litros
Turbo Gas	Av. Tulum entre Palenque y Kukulkan	20°12’28.27	87°28’19.22’’	5,000 litros

Fuente: Elaboración propia.

En caso de un escenario catastrófico donde el tanque de almacenamiento es expuesto a un sobrecalentamiento provocando la ebullición del Gas L.P., falla el sistema de enfriamiento, la presión es tal que se presenta fatiga y falla de los materiales provocando la ruptura del tanque y despresurización súbita del mismo, produciendo una hay explosión acompañada de una bola de fuego.

Para generar las zonas de peligro se utilizan las características de almacenamiento de la sustancia química, la ubicación y datos meteorológicos para el modelado en el software ALOHA. Los resultados de los escenarios modelados de cada estación de servicio se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 110. Zonas de amenaza por estación de servicio de Gas LP.

Nombre	Dirección	Zonas de Amenaza
Turbo Gas	Av. Cobá esquina Okot	Rojo: 170 m (10.0 kW / (m2) = potencialmente letal en 60 segundos) Naranja: 239 m (5.0 kW / (m2) = quemaduras de segundo grado dentro de los 60 segundos) Amarillo: 373 m (2.0 kW / (m2) = dolor en 60 segundos
Gas Tomza Cobá	Calle Bubul-Ek esquina Av. Cobá	Rojo: 170 m (10.0 kW / (m2) = potencialmente letal en 60 segundos) Naranja: 239 m (5.0 kW / (m2) = quemaduras de segundo grado dentro de los 60 segundos) Amarillo: 373 m (2.0 kW / (m2) = dolor en 60 segundos
Tomza Gas	Calle Yaxchen, MZA 862 LT.04	Rojo: 401 m (10.0 kW / (m2) = potencialmente letal en 60 segundos) Naranja: 565 m (5.0 kW / (m2) = quemaduras de segundo grado dentro de los 60 segundos) Amarillo: 880 m (2.0 kW / (m2) = dolor en 60 segundos
Turbo Gas	Av. Tulum entre palenque y kukulkan	Rojo: 170 m (10.0 kW / (m2) = potencialmente letal en 60 segundos) Naranja: 239 m (5.0 kW / (m2) = quemaduras de segundo grado dentro de los 60 segundos) Amarillo: 373 m (2.0 kW / (m2) = dolor en 60 segundos

Fuente: Elaboración propia.

Figura 218. Mapa modelo de explosión GAS LP Ciudad de Tulum.

Fuente: Elaboración propia

El resultado del análisis muestra los radios de explosión en la figura 218; destacando las principales estructuras que pudieran ser dañadas o esparcirse un gas contaminante afectando: escuelas, parques, centros médicos, centros comerciales, negocios y principalmente viviendas.

La zona que representa mayor riego se encuentra sobre la Av. Cobá porque existe la presencia de dos estaciones de distribución de gas LP que tienen una distancia entre sí de 330 metros. Es importante mencionar que las vialidades también serían afectadas dañando automóviles cercanos, y también dificultando el tránsito vehicular.

Gasolineras

La gasolina es un líquido inflamable, su vapor es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo y ocasionar una posible ignición en un punto distante. El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas. Como resultado del flujo, agitación y otros manejos, se pueden generar cargas electrostáticas. La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor, a través de la piel y por ingestión. Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire irritando los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química, incluso puede causar efectos en el sistema nervioso central. En exposición repetida o prolongada el líquido desengrasa la piel, puede afectar al sistema nervioso central e hígado y es posiblemente carcinógena para los seres humanos.

La magnitud y severidad depende del tipo y de la cantidad de material involucrado, como también de la localización que define la exposición y los recursos expuestos. En ese sentido, en la ciudad de Tulum se identificaron 10 gasolineras, mismas que distribuyen hidrocarburos como diésel, gasolina magna y premium (Tabla 111). Las gasolineras suelen ubicarse sobre carreteras o en avenidas principales, en este caso se distribuyen a lo largo de la avenida Tulum y avenida Coba.

Tabla 111. Estaciones de servicio gasolineras ciudad de Tulum.

Nombre	Dirección	Latitud	Longitud	Almacenamiento
G500	Av. Cobá esquina Bubul-Ek	20°13’4.08’’	87°27’15.23’’	100 mil L Magna 80 mil L Premium
FullGas Crucero	Av. Tulum	20°12’54.60’’	87°27’5.62’’	50 mil L Magna 50 mil L Premium
PEMEX ES 2944	Carretera Tulum-Cancun	20°13’8.43’’	87°26’14.30’’	45 mil L Magna 45 mil L Premium
FullGas	Av. Cobá con 4 Ote.	20°13’0.43’’	87°27’14.25’’	30 mil L Magna 30 mil L Premium
Mobil	Carretera Tulum-Cancun	20°13’5.14’’	87°26’23.55’’	60 mil L Magna 40 mil L Premium
PEMEX ES 10800	Av. Cobá sur	20°12’16.36’’	87°27’0.74’’	60 mil L Magna 40 mil L Premium
PEMEX	Av. Tulum esquina Géminis	20°12’47.51’’	87°27’27.08’’	70 mil L Magna 50 mil L Premium
La gas - 1893	Carretera Tulum - Cancún	20°12’58.50’’	87°26’45.32’’	70 mil L Magna 70 mil L Premium
PEMEX ES 14769	Carretera Chetumal - Cancún	20°12’25.30’’	87°28’37.54’’	70 mil L Magna 70 mil L Premium
PEMEX	Carretera Tulum - Cancún	20°12’27.84’’	87°28’28.69’’	70 mil L Magna 70 mil L Premium

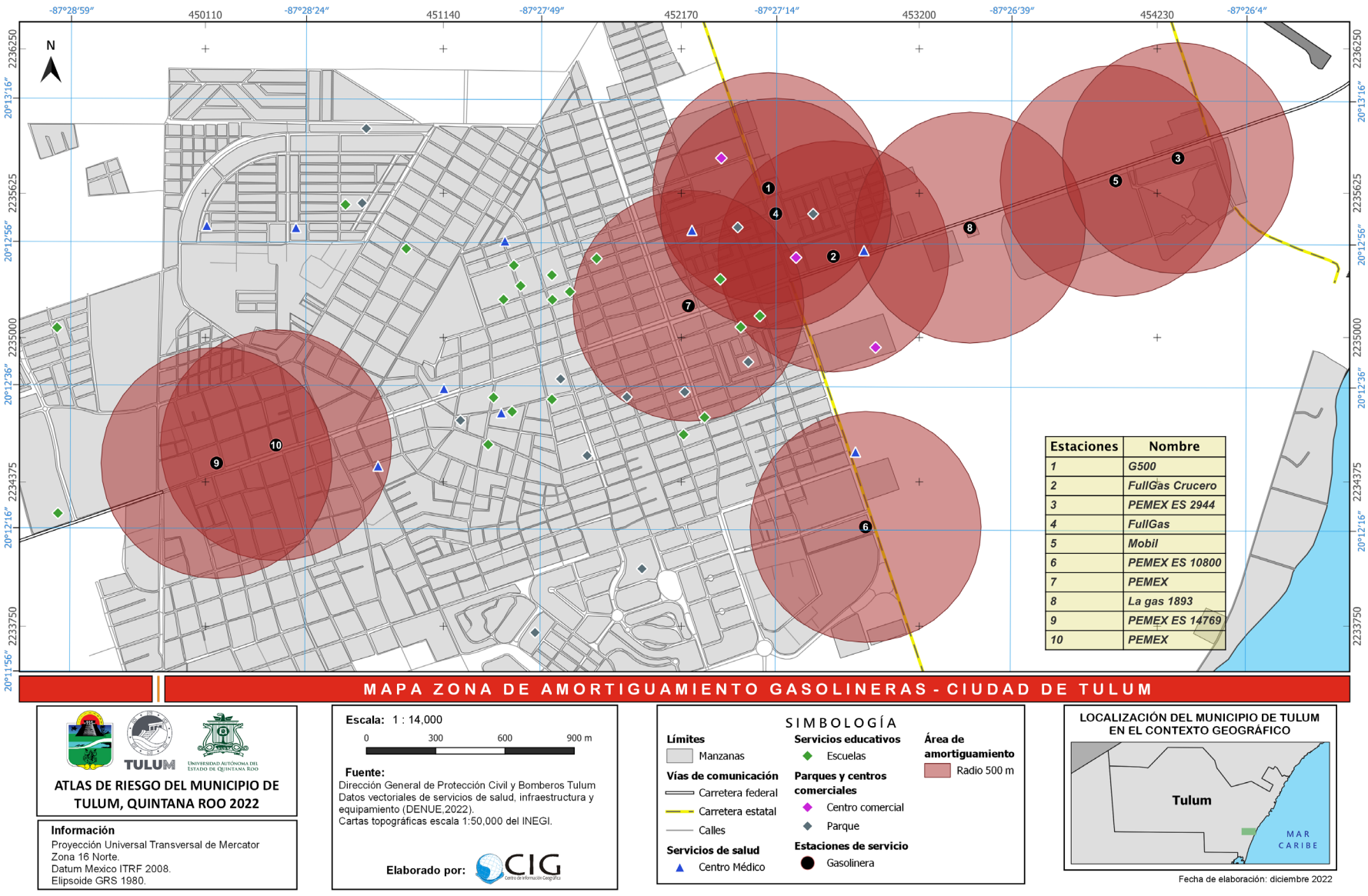
Fuente: Elaboración propia.

Uno de los principales riesgos en las que pueden presentarse en las estaciones de servicio de combustibles consiste en los derrames de gasolina al momento de despachar o de cargar los tanques de almacenamiento. Esto puede generar residuos de combustible que pueden incendiarse generando una reacción conocido como pool fire o bien, se evaporan, formando una nube de vapor tóxico que puede reaccionar a un chispazo o una flama.

Los efectos leves incluyen mareos y dolor de cabeza, mientras que los efectos más serios comprenden estado de coma y la incapacidad para respirar. Inhalar continuamente los vapores de la gasolina causa irritación de nariz, garganta, bronquios y pulmones. Una exposición prolongada o en altas concentraciones de los vapores de la gasolina produce asfixia, colapso, coma, arritmias cardíacas y daña el sistema nervioso (COFEPRIS, 2019)

Por lo anterior, es importante establecer distancias de protección para la identificación de zonas vulnerables, la Guía para la Elaboración de Análisis y Riesgo para el Sector Hidrocarburos establece la distancia mínima que se guarda para las estaciones de servicio correspondiente a un radio de 500 metros que funciona como zona de amortiguamiento.

Figura 219. Mapa zona de amortiguamiento para estaciones de servicio gasolineras.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de los radios se puede observar que la mayoría de las gasolineras no cumple con la distancia mínima de zona de amortiguamiento con respecto al mismo radio de otra gasolinera. Señalando las infraestructuras vulnerables como centros de salud, parques, centros comerciales, restaurantes, hoteles, viviendas y escuelas. (figura 219)

Cabe mencionar que un incidente químico puede encadenarse a otro fenómeno químico y combinarse entre sí provocando en efecto domino con la multiplicación y amplificación de los efectos o consecuencias.

Por su parte, el Reglamento urbano para estaciones de servicio para la distribución de gasolina y combustibles líquidos producto de refinación del petróleo en el estado de Quintana Roo, señala en su Título quinto, Capitulo segundo – Regulación de ubicación y riesgo para estaciones de servicio:

ARTICULO 35.- Por razones de riesgo y protección a los derechos humanos fundamentales a la vida y la salud de los residentes de asentamientos humanos, no se otorgará permiso alguno para Estaciones de Servicio, incluidas las de autoconsumo, que pretendan instalarse:

I. En el centro urbano (CU) del poblado en cuestión, establecido por el Programa de Desarrollo Urbano correspondiente . . .

II. En zonas habitacionales,

III. En terrenos cuya propiedad sea social o nacional,

IV. Eh zonas decretadas como históricas,

V. En áreas naturales protegidas o de preservación ecológica,

VI. En radios menores a 500 metros para protección y amortiguamiento con respecto al mismo radio de otra estación de servicio,

VII. Contiguas a vialidades cuyo arroyo vehicular total sea menor de 12 metros,

VIII. En predios adyacentes a aquel en donde se realicen: labores que incluyan el manejo de soldadura, combustión, procesos de fundición, empleo de flama abierta, altas temperaturas y la utilización de recipientes o contenedores sujetos a presión . . .

IX. En un radio menor de 50 metros con respecto a un urbano de concentración masiva como restaurantes, bares, centros nocturnos, cines y centros comerciales, . . .

X. A menos de 200 metros de escuelas, jardines de niños, guarderías infantiles, centros y estancias de desarrollo infantil; hospitales, clínicas, puestos de socorro, centros de urgencias, asilos y orfanatos, oficinas de gobierno de cualquier naturaleza, parques, mercados, templos y demás elementos de equipamiento urbano.

XI. A menos de 50 metros con respecto a líneas de alta tensión, a menos de 100 con respecto a ductos o poliductos que transportan productos derivados del petróleo, y a menos de 130 metros con respecto a una planta de almacenamiento de gas LP. . .

XII. Respecto a la distancia menor de 50 metros indicada en el punto anterior, en caso de requerirse la construcción de accesos y salidas sobre los ductos que transporten productos derivados del petróleo, se requerirá cumplir con lo establecido por PEMEX. . .;

XIII. A menos de 150 metros de distancia de instalaciones y/o empresas de alto riesgo, como subestaciones eléctricas, áreas de depósito de sustancias químicas inflamables o similares.

XIV. A menos de 3000 metros de pozos de captación y abastecimiento de agua para consumo humano,

XV. A menos de 2000 metros de humedales,

XVI. A menos de 150 metros de las redes primarias para el sistema de abastecimiento de agua potable.

Con base a lo anterior se puede representar las zonas que están en riego por alguna explosión o derrame de combustibles (figura 220). Se identifican estaciones de gasolina que se encuentran sobreponiendo su radio de riesgo tal es el caso de las estaciones 1 y 4, ubicadas sobre la Avenida Coba, estableciendo una distancia entre sí de 112 metros implicando un riesgo mayor en caso de algún incidente. También se encuentra una estación de distribución de gas LP a unos 90 metros incumpliendo el reglamento urbano.

Figura 220. Mapa zona de riesgo para estaciones de servicio gasolineras.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las estaciones 2, 6 y 7 involucran un riesgo principalmente para establecimientos como: restaurantes, hoteles y negocios. En el caso de las estaciones 9 y 10, ubicadas sobre la Av. Tulum, podrían dañar casa-habitación y negocios cercanos.

Por su parte. Las estaciones de gasolina 3, 5 y 8 no representan un mayor riesgo para la afectación a la salud, porque sus alrededores cuentan con vegetación y no hay edificios que acojan una cantidad significante de personas; sin embargo, hay que prestar atención a las construcciones futuras que se realicen a la cercanía de las gasolineras.

Las estaciones de servicio de gasolina representan un riesgo para los vehículos que circulen cerca, en caso de presentarse un incidente uno de los principales afectados sería la movilidad de la ciudad ya que la distribución de las gasolineras se encuentra en las principales vías de acceso de la ciudad de Tulum.

5.4.2. Incendios forestales

Un incendio forestal ocurre cuando el fuego se extiende de manera descontrolada y afecta los bosques, las selvas, o la vegetación de zonas áridas y semiáridas (CONAFOR, 2010). Para que se produzca un incendio forestal se necesitan tres elementos clave: calor, oxígeno y combustible; También influyen las condiciones del tiempo atmosférico y la topografía.

Los incendios forestales pueden ocurrir en cualquier momento; sin embargo, en México se presentan dos temporadas de mayor incidencia: la primera, correspondiente a las zonas zona centro, norte, noreste, sur y sureste del país inician en enero y concluye en junio. La segunda temporada se registra en el noroeste del país iniciando en mayo y terminando en septiembre. Ambas temporadas coinciden con la época de mayor estiaje (sequía) en el territorio nacional.

El fuego puede tener una influencia positiva en la naturaleza, ayudando a mantener la biodiversidad. Pero cuando se utiliza de forma irresponsable o se produce por alguna negligencia, puede convertirse en un incendio forestal de consecuencias devastadoras para el ambiente, incluso para la salud y seguridad de las personas.

En la actualidad, las actividades humanas se han convertido en la principal fuente de incendios, sobrepasando los relámpagos y otras fuentes naturales. Aunado a ello, el calentamiento global y los cambios en los patrones de lluvias y sequías están influyendo en el comportamiento del fuego; es notorio que, de acuerdo a los registros históricos de la CONAGUA, la media de temperatura se ha ido incrementando ocasionando mayor sequedad y disponibilidad de combustibles forestales en los ecosistemas y por ende incendios con mayor dificultad de control.

Es necesario reconocer y resaltar que la mayor parte de los incendios forestales en México son originados por causas relacionadas con las actividades humanas, en ese sentido, los incendios foréstelas formados en el municipio de Tulum están asociados principalmente a actividades agrícolas, cazadores, quema de basureros, fumadores y fogatas.

De acuerdo al análisis de los datos del Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal se identificaron 440 puntos de incendio forestal en el Estado de Quintana Roo durante el periodo del 2015 -2022. Por su parte, dentro del municipio de Tulum se registró 29 incendios forestales, que afectaron principalmente el tipo de vegetación de selva mediana subperennifolia, vegetación de duna costera y manglar.

Tabla 112. Incendios forestales registrados en el municipio de Tulum.

Año	Latitud	Longitud	Municipio	Región	Predio	Causa	Tipo de vegetación
2015	20.473	-87.783	Tulum	Sureste	Las Colmenas	Cazadores	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2015	20.286	-87.676	Tulum	Sureste	Rancho San Francisco	Cazadores	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2015	20.399	-87.622	Tulum	Sureste	Ejido Francisco May	Actividades Agrícolas	-
2015	20.331	-87.542	Tulum	Sureste	Macario Gómez	Cazadores	-
2015	20.189	-87.523	Tulum	Sureste	Kilómetro 12, Carretera Federal	Actividades Agrícolas	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2015	20.289	-87.509	Tulum	Sureste	Macario Gómez	Actividades Agrícolas	0
2015	20.250	-87.475	Tulum	Sureste	Gran Cenote	Fumadores	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2015	20.197	-87.473	Tulum	Sureste	La Veleta	Fumadores	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2015	20.283	-87.462	Tulum	Sureste	Jacinto Pat	Fogatas	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2015	20.223	-87.457	Tulum	Sureste	Terreno IPAE	Fumadores	Selva baja subperennifolia - SBQ
2015	20.256	-87.419	Tulum	Sureste	Línea de Torres	Cazadores	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2016	20.456	-87.830	Tulum	Sureste	Delegación San Pedro	Actividades Agrícolas	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2016	20.509	-87.718	Tulum	Sureste	Coba	Quema de basureros	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2016	20.484	-87.698	Tulum	Sureste	Manuel Antonio Ay	Actividades Agrícolas	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2016	20.048	-87.482	Tulum	Sureste	Reserva de Sian Ka'an	Cazadores	Manglar - VM
2017	19.818	-87.474	Tulum	Sureste	Punta Allen	Desconocidas	Vegetación de Dunas Costeras - VU
2017	19.820	-87.474	Tulum	Sureste	Punta Allen	Desconocidas	Vegetación de Dunas Costeras - VU
2018	20.282	-87.501	Tulum	Sureste	Ejido Tulum	Quema de basureros	Selva mediana subperennifolia - SMQ
2018	19.816	-87.475	Tulum	Sureste	Punta Allen	Quema de basureros	Vegetación de Dunas Costeras - VU
2018	20.104	-87.473	Tulum	Sureste	Sian Ka'an	Fumadores	Manglar - VM
2021	20.194	-87.443	Tulum	Sureste	Km 80/ Aldea Tulum	Desconocidas	Selva Mediana Subperennifolia
2021	20.217	-87.509	Tulum	Sureste	Ejido Tulum/Colonia Cristal	Quema de basureros	Selva Mediana Subperennifolia
2021	19.859	-87.443	Tulum	Sureste	Rita/Sian Ka'an	Quema de basureros	Vegetación de Dunas Costeras
2021	20.120	-87.467	Tulum	Sureste	Camino Blanco, Sian Ka'an	Quema de basureros	Manglar
2021	19.928	-87.446	Tulum	Sureste	Zona Costera de la Reserva de Sian Ka'an	Actividades ilícitas	Vegetación de Dunas Costeras
2022	19.930	-87.450	Tulum	Sureste	Rancho El Retiro/ El Retiro	Actividades ilícitas	Vegetación de Dunas Costeras
2022	19.928	-87.445	Tulum	Sureste	Rancho El Retiro 2/ El Retiro 2	Actividades ilícitas	Vegetación de Dunas Costeras
2022	20.433	-87.651	Tulum	Sureste	Ejido Manuel Antonio/ Raíces Balché	Actividades ilícitas	Selva Mediana Subperennifolia
2022	20.241	-87.504	Tulum	Sureste	La Laguna / Los Caminos	Actividades ilícitas	Selva Mediana Subperennifolia

Fuente: Comisión Nacional Forestal, Gerencia Manejo del Fuego (2022)

En la figura 202 se puede observar en el siguiente mapa las zonas afectadas por los incendios, principalmente son áreas forestales en las que la población tiene fácil acceso y que se localizan a las cercanías de las localidades principales del municipio de Tulum.

Para el análisis de riesgo de incendios forestales se estudia la probabilidad de que se produzca un incendio en una zona determinada y en tiempo determinado. Al respecto la metodología descrita en el “Manual para la elaboración de mapas de riesgo de incendios forestales” (Flores G, et al. 2016) contempla un modelo que considera únicamente factores como: vías de comunicación, localidades e incidencia histórica de incendios; para determinar áreas de riesgo de formación de incendios.

En cuanto a la variable de localidades se consideran dos aspectos que son la cercanía de los habitantes a un área forestal y el número de habitantes en cada población. Esto debido a las diferentes actividades humanas que pudieran propiciar un incendio.

En relación a las vías de comunicación, el sistema de trasporte de transporte terrestre tiene una importante influencia en el riesgo de incendios puesto que representan un acceso a áreas forestales. De igual manera se consideran dos aspectos a tomar en cuenta; la proximidad y el tipo de vías.

Por último, la variable de ocurrencia histórica de incendios se refiere a la frecuencia y causa de incendios. Son los incendios que han ocurrido en años anteriores. Las áreas afectadas en algún momento se asocian con una mayor probabilidad de ocurrencia de nuevos incendios (López,2008). Se utilizaron los registros de incendios forestales del año 2015 al 2022.

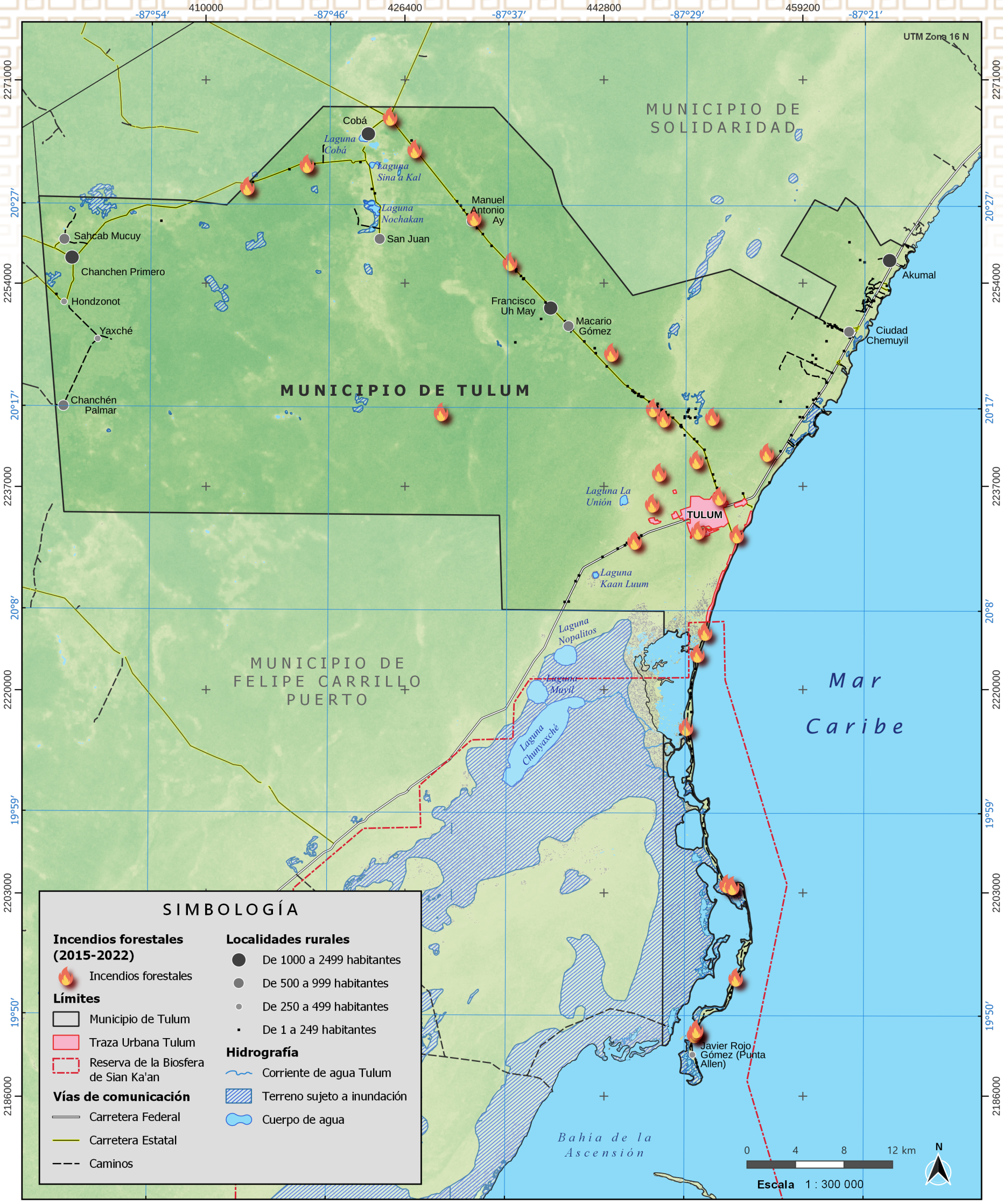
Como resultado de la integración de los criterios antes mencionados se obtuvo el mapa de riesgo de incendios forestales, el cual permite realizar un análisis de las zonas más afectadas. Se identifica que el mayor riego se presenta sobre un tramo de la carretera que se dirige de Tulum hacia la localidad de Macario Gómez. Y también sobre el camino de terrecería que lleva hacia la localidad de Punta Allen afectado la vegetación de dunas costeras y manglar que están dentro de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka’an.

Por otra parte, la región con bajo riesgo a incendios forestales se encuentra al oeste del municipio de Tulum agrupando las localidades de Sahcab Mucuy, Chanchen Primero, Hondzonot, Yaxché y Chanchén Palmar. A causa de un bajo número de habitantes, la mínima circulación en las vialidades y a las quemas controladas que se producen en lo que se refiere a actividades agrícolas.

Mientras que las localidades de Tulum, Coba y Chemuyil que sobresaltan por su actividad turística y constante dinámica de la población indican un nivel medio de riesgo en cuanto a la presencia de incendios forestales a consecuencia de la poca quema de tierras para cultivo. Sin embargo, hay que prestar mayor atención a las quemas por causa de fumadores, fogatas y quema de basureros clandestinos.

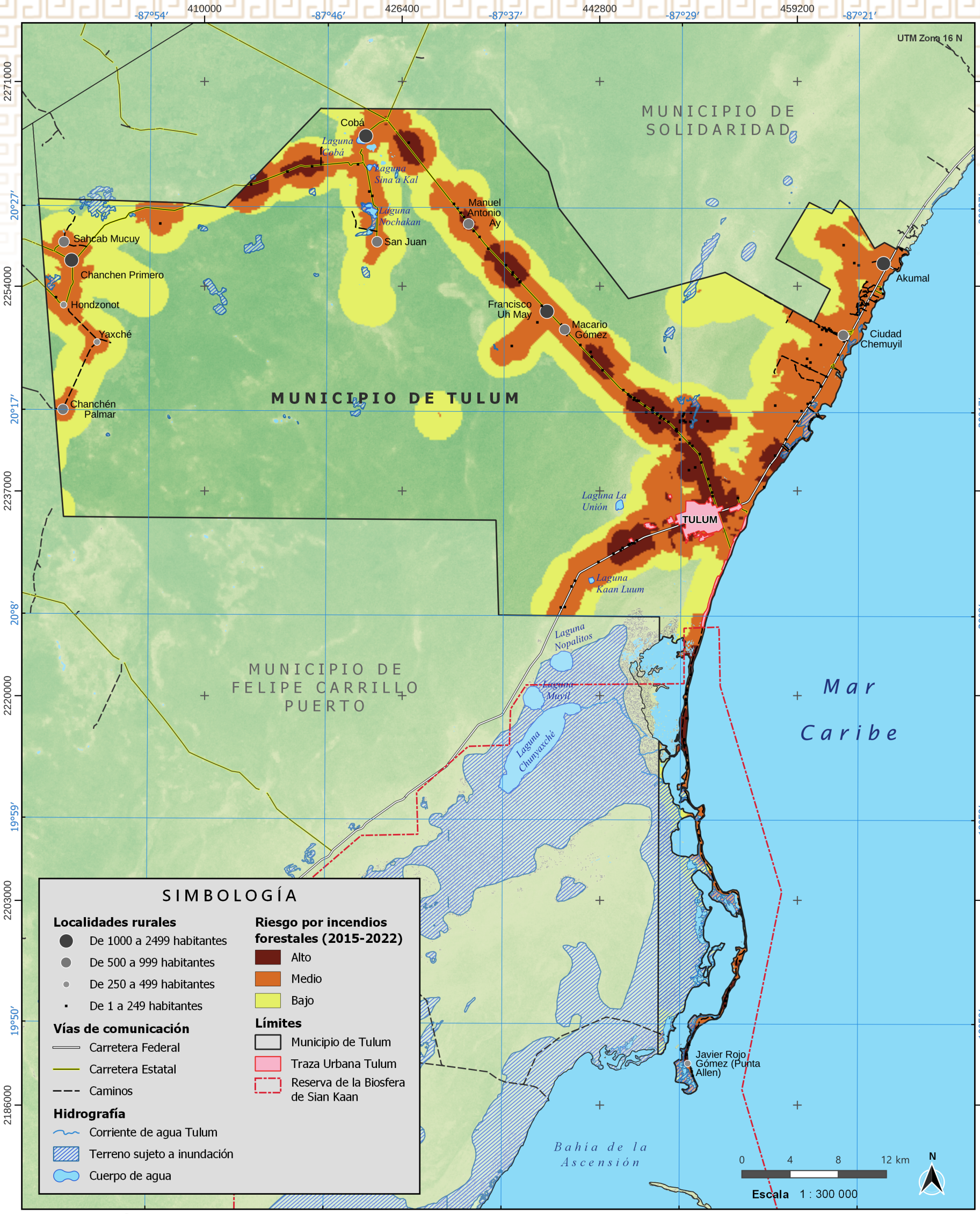
En general hay que tener una meticulosa vigilancia a los incendios forestales que se presentan en el Municipio de Tulum porque se ubican a la cercania de centros poblados provocando problemas relacionados con efermedades respiratorias o cardiovarculares por las particulas de dioxido de carbono que se quedan suspendidas en el aire. Ademas los incendios que salen de control pueden dejar grandes afectaciones como la vivienda de las poblaciones, animales de crianza o hasta en ocasiones vidas humanas.

Figura 221. Mapa de incendios forestales registrados en el municipio de Tulum (2015-2022)



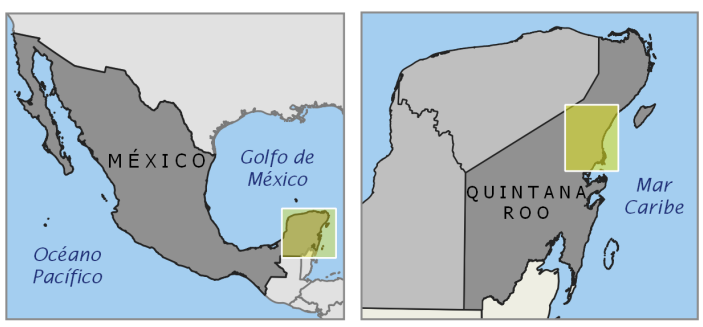
Fuente: Elaboración propia.

Figura 222. Mapa de riesgo por incendios forestales en el municipio de Tulum (2015-2022).



MAPA DE RIESGO POR INCENDIOS FORESTALES (2015 - 2022)

LOCALIZACIÓN EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

TULUM
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:
Estadísticas de incendios forestales 2015 -2022, Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF, 2022).
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Fenómenos sanitario-ecológicos

La Ley General de Protección Civil define un fenómeno sanitario y ecológico como un agente preocupante producido por la acción patógena de agentes biológicos que afectan a poblaciones, animales y cultivos, provocando su muerte o alterando su salud. Una epidemia o plaga constituye un desastre sanitario en el sentido estricto del término. Esta clasificación también incluye la contaminación del aire, el agua, el suelo y los alimentos (LGPC, 2014).

La acción de agentes biológicos obedece muchas de las veces a fenómenos naturales asociados al cambio climático (cambios en la intensidad y duración de la temporada de lluvias y frecuencia de huracanes), también a causas antropogénicas como la deficiencia de servicios públicos (escasez en la dotación de agua, mala disposición de la basura), así como a la falta de percepción de riesgos y escasa participación comunitaria en las actividades de prevención (SESA, 2021).

En Quintana Roo, como región tropical, la prevención de las enfermedades transmitidas por vectores es una estrategia continua y permanente conducente hacia la protección y autocuidado personal, familiar y comunitario, con atención especial en la percepción del riesgo. Esto tiene mayor incidencia durante la temporada de lluvias, por la formación de charcos y el estancamiento del agua en los recipientes al aire libre crean condiciones favorables para que los mosquitos se reproduzcan y transmitan el dengue, el chikungunya y el zika.

Otra enfermedad trasmitida por un virus detectado en China se convirtió en pandemia a nivel mundial. La epidemia de COVID-19 fue declarada por la Organización Mundial de Salud, una emergencia de salud pública de preocupación internacional desde el 30 de enero de 2020. La COVID-19 es ahora un problema de salud establecido, pero que hoy en día ya no constituye una emergencia de salud pública de interés internacional.

Por otro lado, el ambiente o medio ambiente (aire, agua o suelo) estará contaminado si contiene algo (materia, energía en forma de ruido, calor...) que provoque efectos negativos. La contaminación del aire, la contaminación del agua y la contaminación del suelo tienen una estrecha relación y no se pueden separar, lo que complica la solución a los problemas de contaminación (Encinas, 2011).

Los contaminantes son liberados por fuentes de emisión que pueden ser naturales o artificiales. Las fuentes artificiales pueden ser fijas o estacionarias (por ejemplo, industrias) o móviles (por ejemplo, tráfico). Los contaminantes emitidos directamente por la fuente se denominan contaminantes primarios y se emiten con un flujo o nivel de emisión que es la velocidad a la que lo emite la fuente y, por tanto, unidades de masa por unidad de temperatura.

5.5.1. Contaminación aire, suelos y agua

La concentración de un contaminante ya sea primario o secundario, después de la dispersión, es el nivel de emisión y tiene unidades de masa por unidad de volumen. Una vez liberados al medio ambiente (aire, agua o suelo), los contaminantes sufren una serie de procesos, no solo de transporte y dispersión, sino también de reacciones químicas, convirtiéndose en contaminantes secundarios (Encinas, 2011).

La contaminación del aire (tanto en el exterior como en el interior) se puede definir como la presencia de agentes químicos, físicos o biológicos que alteran las propiedades naturales de la atmósfera. Los electrodomésticos de combustión (aires acondicionados, hornos, radiadores y secadoras y otros), así como los vehículos motorizados, las instalaciones industriales y los incendios forestales son fuentes comunes de contaminación del aire. La calidad del aire está estrechamente relacionada con el clima del planeta y los ecosistemas de todo el mundo.

Los contaminantes que plantean la mayor preocupación para la salud pública son las partículas pequeñas suspendidas en el aire, del monóxido de carbono, del ozono, del dióxido de nitrógeno y del dióxido de azufre. La contaminación del aire interior y exterior causa enfermedades respiratorias y otras enfermedades y es una de las principales causas de enfermedad y muerte (OMS, s.f.).

Por otro lado, la contaminación del agua se señala cuando contiene compuestos que impiden su uso. Las fuentes de contaminación del agua pueden ser naturales (también llamadas geoquímicas provenientes del suelo) o artificiales (concebidas por el hombre). Normalmente, las fuentes naturales están muy dispersas y pocas a salvo de contaminación en algunos lugares muy concretos. Por otra parte, la contaminación antropogénica se concentra en áreas específicas (zonas industriales, ciudades, etc.), estos contaminantes son mucho más peligrosos que los emitidos por fuentes naturales.

Atmósfera

La atmosfera se compone de diferentes gases naturales entre los que encontramos al Nitrógeno (N2), Oxigeno (O2), Ar (Argón) y CO2 (Dióxido de Carbono).

El proceso de contaminación atmosférica se desarrolla en tres pasos fundamentales: emisión, procesos y efectos. Primero, la liberación de un contaminante al aire ocurre a una tasa o nivel de emisión, que es el volumen de un contaminante que una fuente libera por unidad de tiempo. Luego, los contaminantes sufren los procesos de dispersión, transporte y transformación en el aire, dando así el nivel o volumen del contaminante esparcido en el aire en un punto alejado de la fuente por m3 de aire. Finalmente, los contaminantes depositados en la superficie del receptor provocan los efectos nocivos.

Las fuentes de contaminación del aire pueden ser naturales o artificiales (también por humanos) depende de si hay intervención humana o no. Las artificiales también pueden ser fijas o móviles. La Tabla 113 muestra las principales fuentes de la contaminación del aire.

Tabla 113. Principales fuentes de contaminación atmosférica

Fuentes naturales	Fuentes artificiales	
	Fijas	Móviles
Volcanes	Centrales térmicas	Vehículos diésel Vehículos gasolina Sin plomo
Incendios forestales por rayos	Centrales nucleares	
Plantas en descomposición (agua y suelo)	Procesos industriales	
Océanos	Incineración de residuos	
Suelo	Calefacciones domésticas	
Tormentas eléctricas	Quema de la biomasa	

Fuente: Encinas (2011).

Las cifras a nivel mundial muestran la gran importancia de las fuentes naturales sobre las artificiales para todos los contaminantes, con la excepción del SO2 (dióxido de azufre), donde las dos fuentes son casi iguales, no obstante, para el NO2 (dióxido de nitrógeno), su totalidad se debe a las actividades antropogénicas.

Clasificación de los contaminantes según si composición

Según su composición los contaminantes se pueden clasificar en distintos grupos, como lo señala Encinas (2011):

- **Compuesto de Carbono: CO y CO_2**

  <u>Monóxido de Carbono (CO)</u>

  Incluyen primarios CO_2 y el CO. No hay contaminantes secundarios. Es el contaminante primario más abundante en la troposfera. Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Es estable (tiempo promedio = 2 - 4 meses). No es soluble en agua.

  Fuentes

  - Oxidación de CH_4 (Metano)
  - Gases volcánicos: (erupciones volcánicas)
  - Incendios forestales
  - Tormentas eléctricas
  - Océanos: las algas y otras fuentes biológicas aportan CO al agua que se libera a la atmósfera
  - Quema de la biomasa
  - Combustión incompleta de compuestos de carbono,

debido a un déficit de O_2.

- Reacción a elevada temperatura entre el CO_2 y C, típica de procesos industriales como por ejemplo en los altos hornos.
- Disociación del CO_2 a temperaturas altas, por ejemplo, en los vehículos o en la incineración de residuos.
- Oxidación de hidrocarburos emitidos por el transporte y por los disolventes industriales

Efectos

- Es tóxico para los animales porque en concentraciones superiores a 0.86 g m-3 se combina fuertemente con la hemoglobina de la sangre para formar la carboxihemoglobina, y reduce su capacidad de transportar O2.
- Afecta a las plantas si su concentración supera las 0.11 g m-3.
- Formas de eliminación
- El CO se elimina por su oxidación a CO2 por los radicales OH o por el O_2 del aire, pero esta última reacción es muy lenta.
- El suelo es un sumidero de CO debido a los hongos. Se han encontrado hasta 14 especies de hongos que usan CO para sus procesos biológicos
- Las plantas superiores poseen capacidad de absorción de CO
- Deposición seca

<u>Dióxido de Carbono (CO_2)</u>

Es un gas incoloro, inodoro y muy soluble en agua. Solo es considerado contaminante cuando se encuentra en concentraciones elevadas.

Fuentes

- Erupciones volcánicas
- Incendios forestales
- Respiración de los seres vivos
- Quema de la biomasa
- Oxidación de CO
- Combustión completa de compuestos con C

Efectos

- No es realmente tóxico salvo que su concentración sea muy elevada. Si se inhala o ingiere en cantidades elevadas puede producir: asfixia, congelación y daños renales o coma.
- Efecto invernadero

Formas de eliminación

- Fotosíntesis de plantas microscópicas en el océano. El mar absorbe, de hecho, más del 85 % del CO_2 liberado a la atmósfera.
- La fotosíntesis de las grandes masas boscosas.
- Deposición húmeda
- Deposición seca

- **Compuesto de Azufre (S): SO_2**

<u>Dióxido de azufre (SO_2)</u>

Es un gas incoloro, no inflamable y bastante estable. Su temporalidad es de 2 a 4 días. Es muy soluble en agua y tiene un importante poder reductor.

Fuentes

- Combustión de combustibles fósiles
- Erupciones volcánicas
- Incendios forestales
- Reducción de Anión (SO42-) en aguas y suelos escasos de oxígeno
- Incineración de residuos
- Quema de la biomasa
- Oxidación de OCS (sulfuro de carbonilo) producido en el mar, con el radical O.
- Oxidación del H2S por parte del O atómico, O2 y O3
- Oxidación del dimetilsufuro (DMS), H2S y CS2 por el radical OH, en la troposfera.
- Procesos de elaboración industrial: operaciones de fundición por el uso de muchos sulfuros

Efectos

- Se oxida e hidrata hasta formar H2SO4 (Acido Sulfúrico) con lo que contribuye de forma muy importante a la lluvia ácida
- Salud: Produce una sensación de quemazón, sequedad y dolor en nariz y garganta. Produce una abundante secreción que puede ser sanguinolenta, hemorragias nasales, tos, lagrimeo y pinchazos en los ojos, además de ardor de estómago, náuseas, dolor torácico y dificultad al respirar.
- En las plantas produce necrosis apicales de color rojo o anaranjado, causada por dificultades en el mecanismo sintetizador de la clorofila
- Formas de eliminación
- Deposición húmeda (rainout o washout)
- Deposición seca: adsorción en materiales e incorporación al metabolismo de las plantas
- Oxidación a SO_4^{2-}

- **Compuestos de Nitrógeno (N): N_2O, NO y NO_2**

Casi todo el N2O atmosférico procede de fuentes naturales, el NO procede tanto de fuentes naturales como antropogénicas y el NO2 emitido al aire es fundamentalmente antropogénico.

<u>NOx (Conjunto de NO y NO_2)</u>

El NO y el NO_2 se suelen considerar en conjunto con la denominación de NOx ya que el NO sufre una rápida oxidación a NO_2, siendo éste el que predomina en la atmósfera. El NO es un gas incoloro, inodoro y no inflamable. Es tóxico e insoluble en agua. El NO_2 es un gas de olor asfixiante y no inflamable. Es tóxico y muy soluble en agua.

Fuentes

- El NO se produce en procesos biológicos y por fijación del N_2 al O_2 atmosférico
- El NO_2 se produce en las descomposiciones biológicas.
- Descomposición de los nitratos del suelo
- Incendios forestales
- Erupciones volcánicas
- Tormentas eléctricas
- Quema de biomasa
- Incineración de residuos
- Combustión a altas temperaturas, por reacción entre el N y el O, en generadores de calor y vehículos.
- Procesos industriales de compuestos nitrogenados,

fertilizantes y explosivos.

- Oxidación fotoquímica del NO mediante reacciones con el O3, ciertos hidrocarburos y O2

Efectos

- Se oxida e hidrata hasta formar HNO3 (Ácido Nítrico) con lo que contribuye de forma muy importante a la lluvia ácida
- Formación del smog fotoquímico
- Influye en las reacciones de formación y destrucción del O3, tanto troposférico como estratosférico
- En concentraciones altas produce daños a la salud y a las plantas
- Formas de eliminación
- Deposición húmeda (rainout o washout)
- Deposición seca (procesos de absorción)

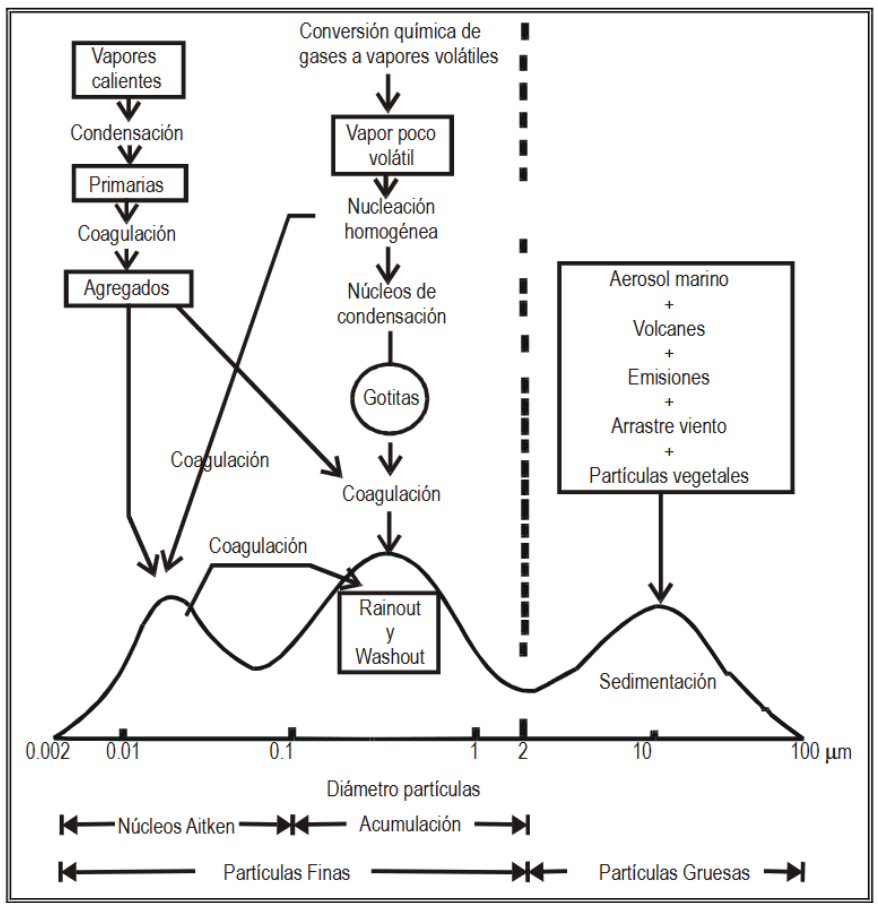
- **Partículas y aerosoles**

Los aerosoles atmosféricos se definen como suspensiones de partículas sólidas o líquidas en el aire. Las partículas en la atmósfera pueden tener un diámetro de 0.002 µm a 100 µm. El límite inferior, 0.002 µm, es bastante controvertido ya que no existen criterios aceptados sobre si un conjunto de moléculas puede considerarse una partícula (Encinas, 2011). Sin embargo, este es el tamaño de partícula más pequeño detectado hasta la fecha.

El límite superior, 100 µm, corresponde al tamaño de arena muy fina. Hay partículas más grandes en la atmósfera, como gotas de lluvia de aproximadamente 1 mm de diámetro o granizo de 1-20 mm de tamaño, pero sus tasas de deposición muy altas las descartarán para cualquier propósito, es decir, de la definición de partículas.

Las partículas se clasifican en tres rangos (figura 223). Los dos primeros rangos de tamaño (núcleo de Aitken y acumulación) están estrechamente relacionados y tienen características bastante similares. De hecho, las partículas de modo nuclear de Aitken pueden agruparse y crecer hasta convertirse en partículas de modo acumulativo. Por eso se llama modo acumulativo. Los dos modos se agrupan bajo el nombre de partículas finas. Sin embargo, no existe una relación significativa entre los regímenes más pequeños y las partículas sedimentables, también conocidas como partículas gruesas.

Figura 223. Distribución de partículas de aerosoles



Fuente: Tomado de Encinas (2011).

Fuentes, efectos y formas de eliminación

Las partículas finas proceden fundamentalmente de la fuente antropogénica, como son los procesos de conversión gas-partícula a temperatura ambiente y los procesos de combustión. Debido a su pequeño tamaño, estas partículas no pueden depositarse rápidamente y se eliminan de la atmósfera por deposición húmeda (rainout o washout). Estas partículas debido a su tamaño pueden penetrar en el tracto respiratorio provocando numerosos problemas respiratorios. Además, son también responsables de la reducción de la visibilidad.

Las partículas gruesas se generan normalmente por procesos mecánicos (viento, erosión, etc.). Pertenecen a este rango, por ejemplo, el aerosol marino o el aerosol terrígeno. Como consecuencia de su origen, estas partículas son relativamente grandes y, por lo tanto, se eliminan por deposición seca o húmeda (washout). No tienen efectos sobre la salud puesto que se depositan rápidamente. Sus efectos principales están en la corrosión de materiales y en los procesos del suelo alterando su equilibrio.

- **Metales pesados**

Muchos metales pesados son micronutrientes esenciales para la vida de los organismos y deben ser absorbidos por las raíces de las plantas o como parte de la dieta de un animal. Están presentes en la atmósfera en niveles muy bajos. En el aire tienen una temporalidad media de 7 a 30 días, pero en el suelo, agua o en los seres vivos son más persistentes y se acumulan convirtiéndose en contaminantes primarios, tóxicos y peligrosos. Entre los más dañinos están el Hg (mercurio) y el Pb (plomo).

Fuentes

- Erupciones volcánicas
- Pesticidas inorgánicos. Ya no se usan, pero como son muy persistentes, sigue habiendo lugares con concentraciones altas de estos productos.
- Abonos
- Lixiviación en los vertederos
- Los vehículos: gasolinas con Pb (plomo)
- Procesos industriales

Efectos

- Algunos metales pueden acumularse en la cadena trófica debido a que no se degradan en la naturaleza, ni química ni biológicamente, por lo que, pueden provocar graves daños en la salud a pesar de sus bajas concentraciones.
- Algunos compuestos orgánicos del plomo atmosférico son absorbidos por el hombre, principalmente a través del sistema respiratorio, afectando a los huesos, a la inteligencia de los niños, a los fetos de las madres gestantes y al sistema nervioso.
- Afectan al crecimiento de las plantas

Formas de eliminación

- Deposición húmeda (*rainout o washout*)
- Deposición seca de las partículas que los contienen

- **Hidrocarburos**

Son contaminantes primarios. Muchos metales pesados son micronutrientes esenciales para la vida de los organismos y deben ser absorbidos por las raíces de las plantas o como parte de la dieta de un animal. Están presentes en la atmósfera en niveles muy bajos.

Metano (CH4)

Es el más abundante e importante de los hidrocarburos atmosféricos. Es un contaminante primario incoloro e insoluble en agua. Su temporalidad media es de 5 a 10 años.

Fuentes

- Descomposición anaerobia de materia orgánica: El metano es producido por microbios que viven en condiciones anaeróbicas degradando la materia orgánica. En Los medios en los que actúan estos microbios son muy variados:
  - minas de carbón donde se le conoce como el gas grisú,
  - instalaciones defectuosas de extracción de gas natural (el 90 % del cual es metano) y en gasoductos construidos para su transporte
  - en el estómago de un rumiante,
  - en el interior de un estercolero,
  - un campo inundado para el cultivo de arroz o
  - el fondo de una marisma,
  - en los pantanos (donde se le conoce como gas de los pantanos)
- Incendios forestales
- Vegetación: las hojas vivas de los árboles y de las plantas emiten metano
- Vertederos
- Quema de la biomasa
- Procesos de combustión, refino y transporte del petróleo y sus derivados

Efectos

- Efecto invernadero
- Interviene en las reacciones estratosféricas
- No produce daños en la salud ni en los seres vivos
- Formas de eliminación
- Reacción con los radicales OH y con el O atmosférico, formando radicales de metilo.
- Deposición seca

- **Oxidantes fotoquímicos: O3 troposférico y estratosférico**

El O_3 (ozono) es el principal oxidante de la atmósfera. Desempeña dos funciones completamente diferentes según se encuentre en la estratosfera o en la troposfera. El O_3 en la estratosfera absorbe la radiación ultravioleta peligrosa que nos llega del sol, mientras que el O_3 en la troposfera es un importante contaminante secundario.

<u>Ozono Troposférico (O_3)</u>

Es un gas azulado, corrosivo e irritante. Debido a su carácter de oxidante fuerte, es bastante inestable (solo es estable a altas temperaturas).

Fuentes

- Reacción de los NOx naturales con los COV biogénicos en presencia de radiación solar (fotoquímicas)
- Incursiones del O_3 estratosférico
- Descargas eléctricas en las tormentas
- La fotooxidación de CH_4 y CO en presencia de NOx

Efectos

- Es el componente más dañino del smog fotoquímico,
- Causa daños importantes a la salud ya que afecta a la mucosa
- Efecto invernadero
- Frena el crecimiento de las plantas.
- Formas de eliminación
- Deposición seca y, en menor grado, deposición húmeda (es poco soluble)
- Fotolisis por el ultravioleta-visible
- Reacción con NO_2, HO_2 e hidrocarburos insaturados

5.5.1.1. Metodología

Se obtuvieron mapas de contaminación del aire para el municipio de Tulum a través de imágenes de satélite Sentinel 5P y su sensor *TROPOspheric Monitoring Instrument* (TROPOMI). De este sensor se descargaron datos de contaminación atmosférica provenientes de S5-P: aerosoles, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, vapor de agua y dióxido de azufre. Además de estos componentes también se pudieron obtener las variaciones de metano, ozono y dióxido de azufre para julio de 2023.

Para lo anterior, se utilizaron dos procesos metodológicos y diferentes programas de software para percepción remota. Entre estos, el primer proceso se realizó desde *Google Earth Engine*, el cual, aplicando *scripts* (códigos de programas) se pudo acceder a datos atmosféricos históricos (2018 a 2023) pudiendo descargar secuencias temporales de datos de monóxido de carbono (CO), indicador de aerosoles y dióxido de nitrógeno troposféricos, estratosférico y total (NO_2) con una resolución aproximada de 1 kilómetro (0.01 arc sec). Las cuales fueron adaptadas al territorio de estudio y reproyectadas a UTM Zona 16N y transformadas a un tamaño de celda de 90 metros.

Las unidades de medida para cada variable responden:

- Dióxido de Nitrógeno (NO_2): mol/m²
- Dióxido de Nitrógeno Troposférico (NO2): mol/m²
- Dióxido de Nitrógeno Estratosférico (NO_2): mol/m²
- Monóxido de Carbono (CO): mol/m2
- Vapor de agua H_2O: mol/m²
- Aerosol: media de prevalencia de aerosoles en la atmósfera

Por otro lado, se emplearon técnicas de geoprocesos desde los programas SNAP, ArcMap, QGis completando los métodos con el Navegador EO (https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser), el cual permite visualizar las imágenes obtenidas por la serie de satélites Sentinel.

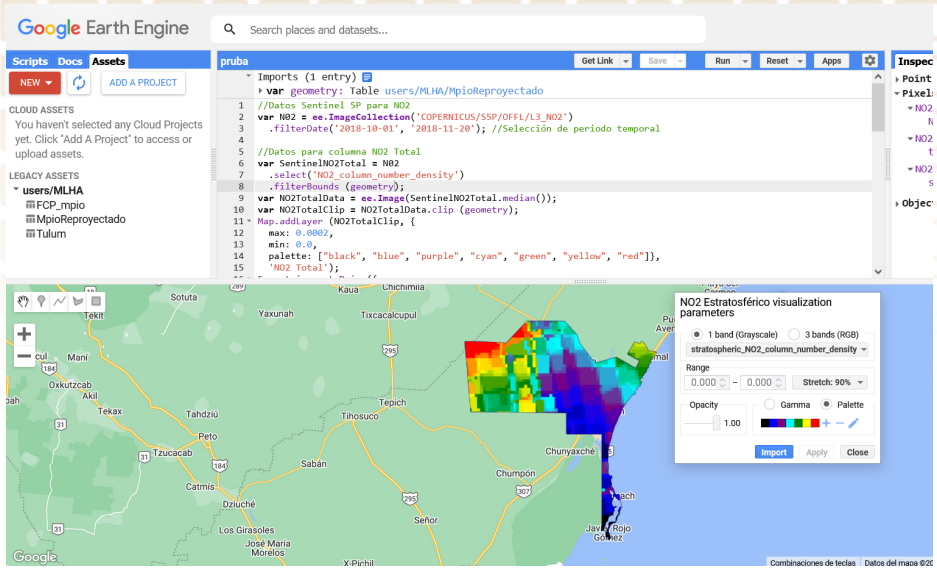
Con lo anterior se pudo obtener cuatro mapas más para gases contaminantes de Metano (CH_4), Ozono (O_3), Dióxido de azufre (SO_2) y Formaldehído (CH_2O).

5.5.1.2. Memoria de cálculo

- **Primer paso** se acceso al entorno de trabajo de Google Earth Engine (GEE)
- **Segundo paso** se señala la zona de interés (municipio de Tulum)
- **Tercer paso** se corre el script para el cálculo definiendo las fechas de análisis (temporalidad)
- **Cuarto paso** una vez has ajustado la fecha temporal y definido el área de interés (AOI) se activa la opción RUN de la zona superior y se cargarán en el visor los datos atmosféricos.
- El resultado se muestra en el visor
- Para descargar la información se debe acceder a la pestaña Task donde se observa el listado de todas las capas disponibles para descargar.
- Finalmente, ejecutando el botón Run se comenzarán a descargar los datos en formato GeoTIFF y quedan archivados en Google Drive

- Se aplica un factor de conversión para la publicación de los datos en unidades de micromol · m−2
- Se realiza la cartografía correspondiente en un software de SIG.

Figura 224. Entorno de trabajo GEE.



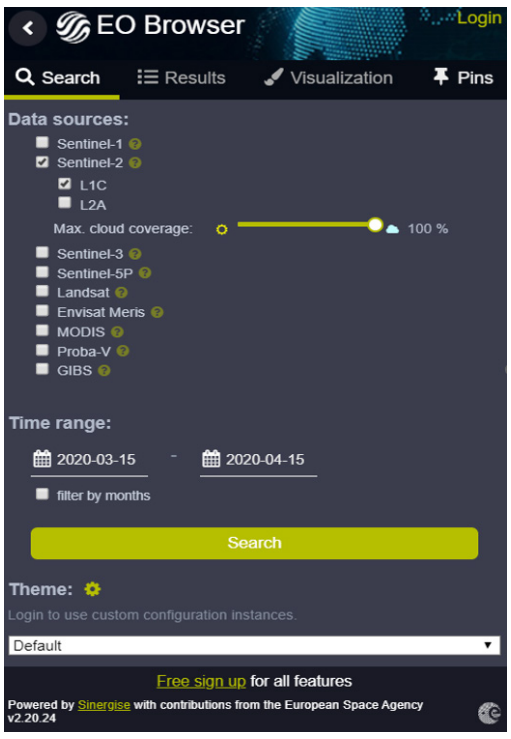
Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, para los últimos cuatro mapas correspondientes a los gases de Metano (CH_4), Ozono (O_3), Dióxido de azufre (SO_2) y Formaldehído (CH_2O), los pasos para su obtención fueron los siguientes:

Paso 1. Se accede al sitio web de EO Browser (https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/)

Paso 2. Se ingresa con la cuenta gratuita de usuario haciendo clic en "Login".

Paso 3. Se elige el satélite de donde se descargarán los datos: Sentinel 5p L2A.

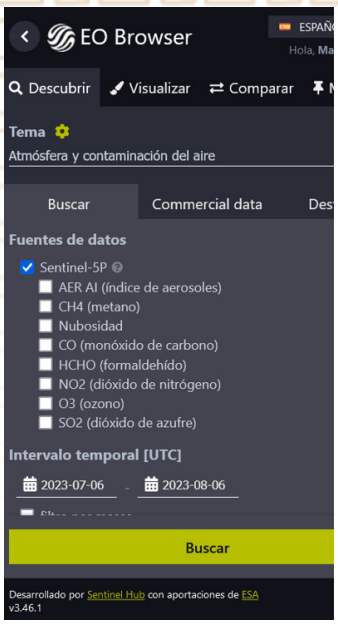


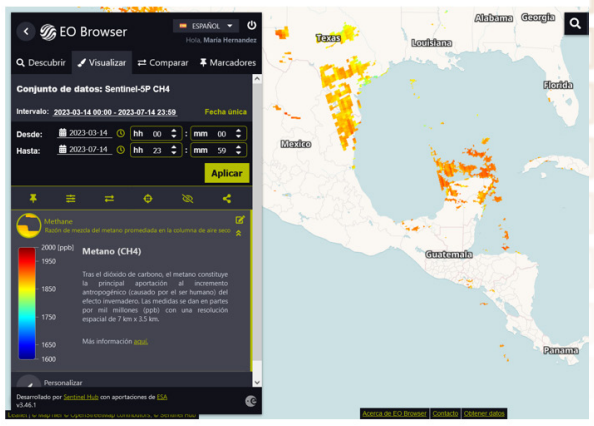
Paso 4. Se define el Área de Interés (AOI): Municipio de Tulum, en este caso se cargó un archivo en formato GEOJSON/JSON para definir el área de interés. Esa área se utilizará para recortar al exportar la imagen.

Paso 5. Se seleccionaron las fechas de inicio y de fin, en este caso para Metano fueron del 14 marzo 2019 al 14 de julio 2023. Para el Ozono desde el 21 de julio 2018 a 21 de julio 2023, para el Dióxido de Azufre de julio 15 2018 a julio 15 2023 y para el Formaldehído de

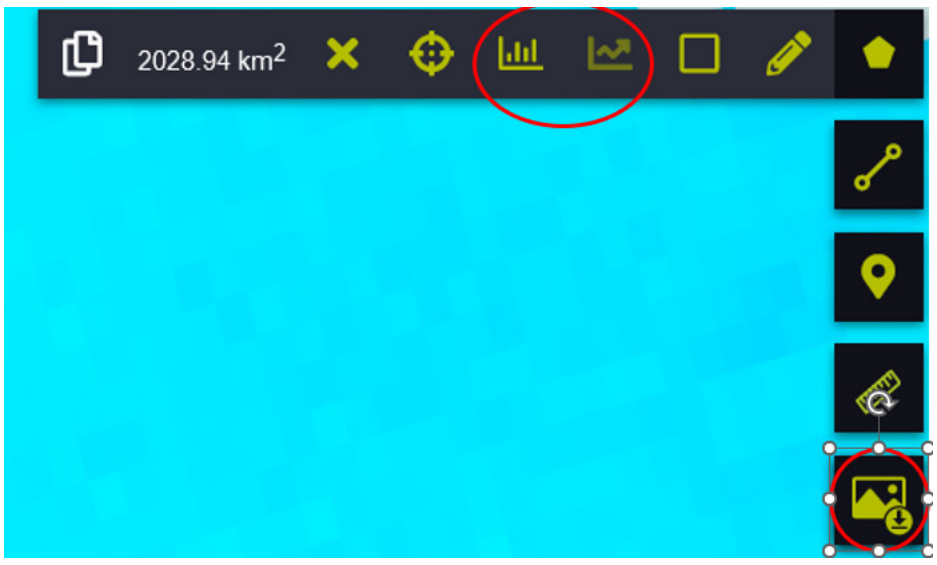


Paso 6. Se visualizan las fuentes de datos y se eligen los que nos servirán para el análisis, los cuales se muestran en el navegador.





Paso 7. Se descargan las imágenes y gráficas de cada uno de los gases utilizados en este Atlas.



Paso 8. Se procede a realizar las figuras o mapas correspondientes.

5.5.1.3. Resultado análisis

Con GEE y el sensor TROPOMI/Sentinel5p (ESA) se obtuvieron seis mapas de gases contaminantes para el municipio de Tulum, cada uno para los elementos mencionados anteriormente y con una temporalidad de análisis de 5 años (2018 a 2023).

Se presentan los primeros tres mapas correspondientes a los componentes del Nitrógeno (NO) o NOx (figuras 225, 226 y 227), como se conocen. Como ya se había señalado el NO procede tanto de fuentes naturales como antropogénicas y el NO_2 emitido al aire es fundamentalmente antropogénico. Por lo que se presenta el promedio quinquenal de la distribución territorial del Dióxido de Nitrógeno (NO_2): Total (suma del NO" troposférico y estratosférico), Troposférico y Estratosférico para el municipio de Tulum en mol/m².

La columna de densidad del NO_2 Estratosférico y Troposférico detecta cambios en la composición atmosférica en combinación con instrumentos terrestres en tierra también se evalúa la atmósfera estratosférica.

En la estratosfera, los óxidos de nitrógeno son un actor clave en la química del agotamiento del ozono (O_3). En la troposfera, la fotólisis de NO_2, es la responsable de la producción de O_3, sin embargo, su acumulación está asociada con impactos negativos en la salud humana, el ecosistema y el forzamiento radiativo, es decir, la variación climática (Müller, 2021).

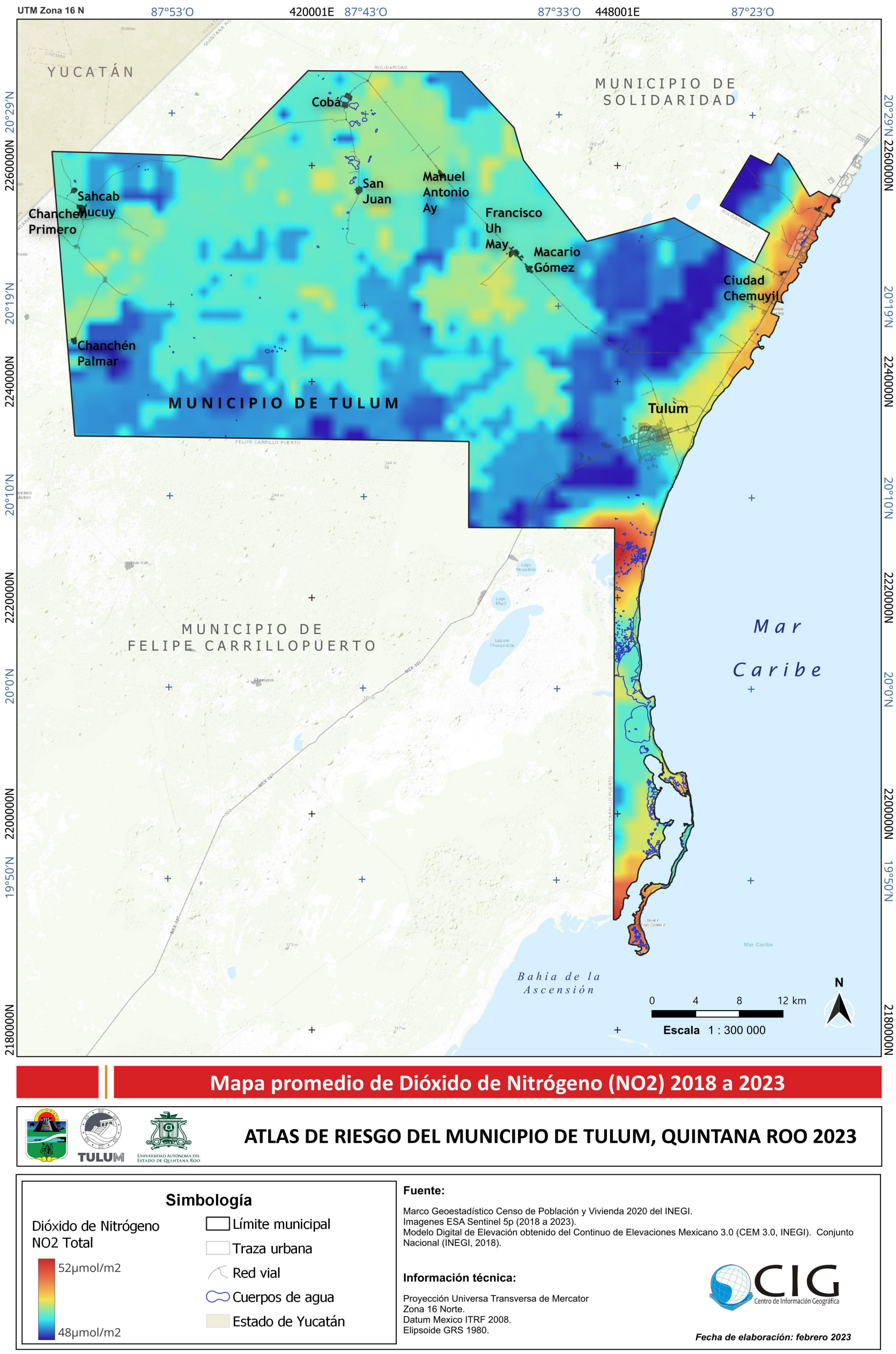
De acuerdo con Zhang, et al. (2022) más de 100 µmol/m² se consideran valores altos de concentración de Nx. Si observamos la figura 225, los valores alcanzados para NO_2 Total fueron de 48 a 52 µmol/m² concentrándose más cerca de la costa y al sur donde se existe una concentración de manglares, donde inicia el Área Natural Protegida de Sian Kaa´n esto se debe, como consecuencia, tal vez, al incendio de la Reserva originado en 2019 y a la descomposición de los nitratos del suelo y la combustión a altas temperaturas, por reacción entre el N y el O, en generadores de calor y vehículos. Hacia el interior del municipio estos valores disminuyen, llegando al 48 µmol/m².

Para el NO_2 Troposférico los valores alcanzados fueron de 7.5 a 11.1 µmol/m² (figura 226) y para el NO_2 Estratosférico de 40.14 a 40.43 µmol/m², se puede considerar un promedio de 40 µmol/m², para este último, sin embargo, se observan tres áreas muy diferenciadas se debe recordar que los NOx son factores clave en la química del agotamiento del ozono, por lo que se recomienda mayor análisis a lo detectado.

Si bien, no se observan valores altos o muy nocivos de NOx, se debe monitorear la calidad de la emisión de estos gases a la atmósfera porque pueden, en un momento dado, ser causa de daño a la salud de la población.

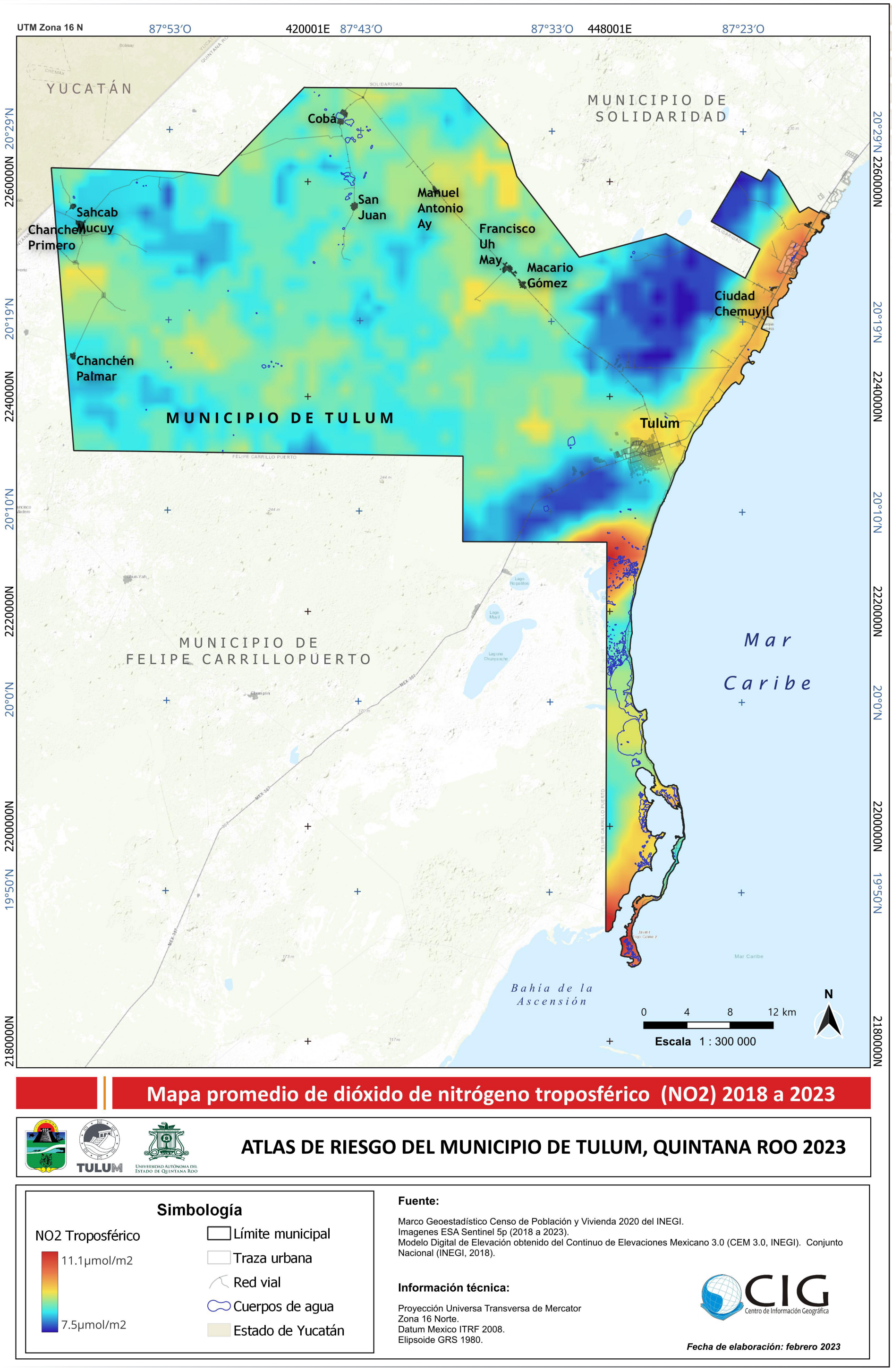
5.5.1.4. Mapas resultantes de gases contaminantes

Figura 225. Contaminación por NO2 Total de 2018 a 2023, Tulum.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 226. Contaminación por NO_2 Troposférico de 2018 a 2023, Tulum.



Mapa promedio de dióxido de nitrógeno troposférico (NO2) 2018 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

NO2 Troposférico

11.1µmol/m2

7.5µmol/m2

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Cuerpos de agua
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2018 a 2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

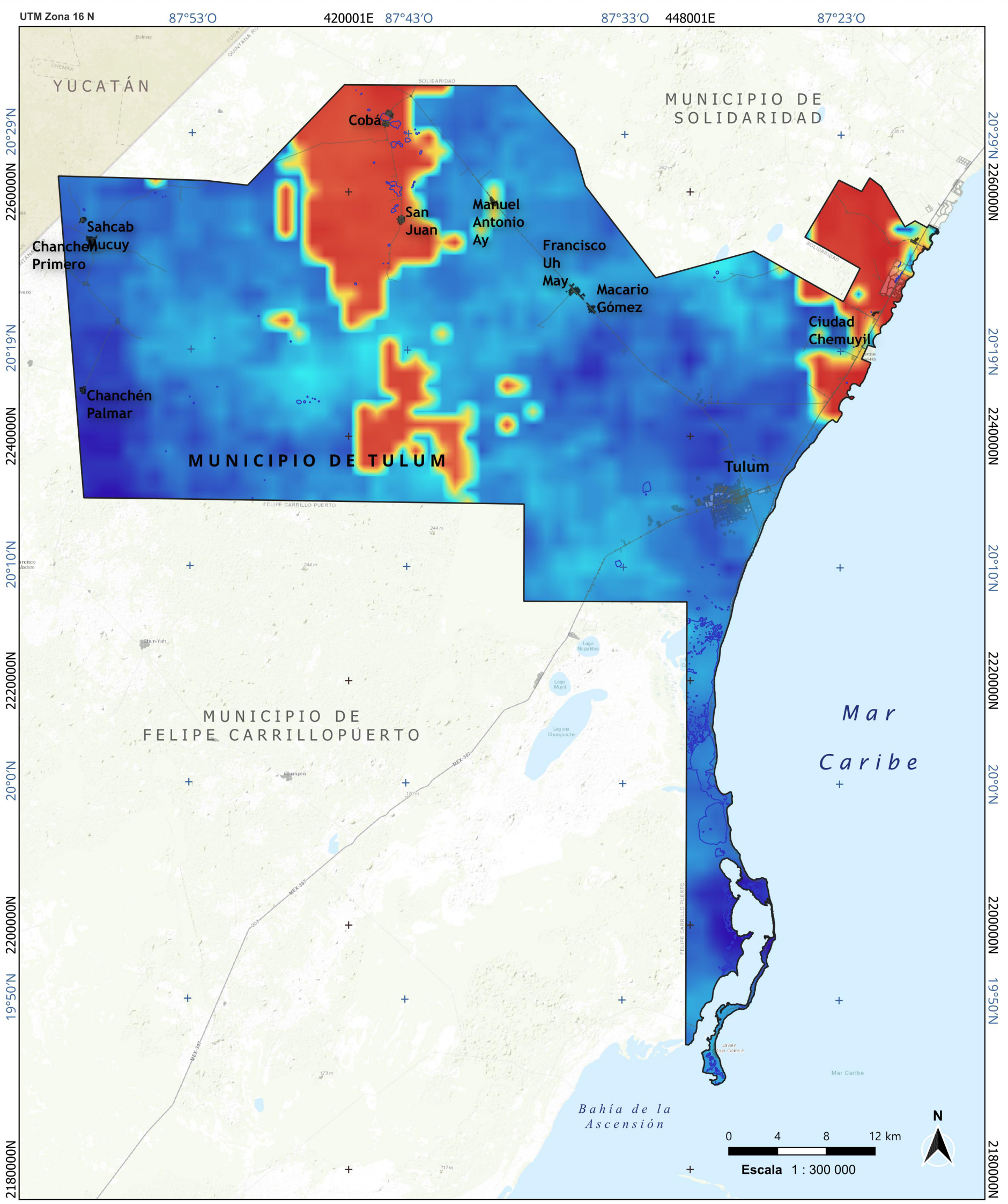
Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

Figura 227. Contaminación por NO_2 Estratosférico de 2018 a 2023, Tulum.



Mapa promedio de dióxido de nitrógeno estratosférico (NO2) 2018 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

NO2 Estratosférico
40.43µmol/m2
40.14µmol/m2

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Cuerpos de agua
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2018 a 2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

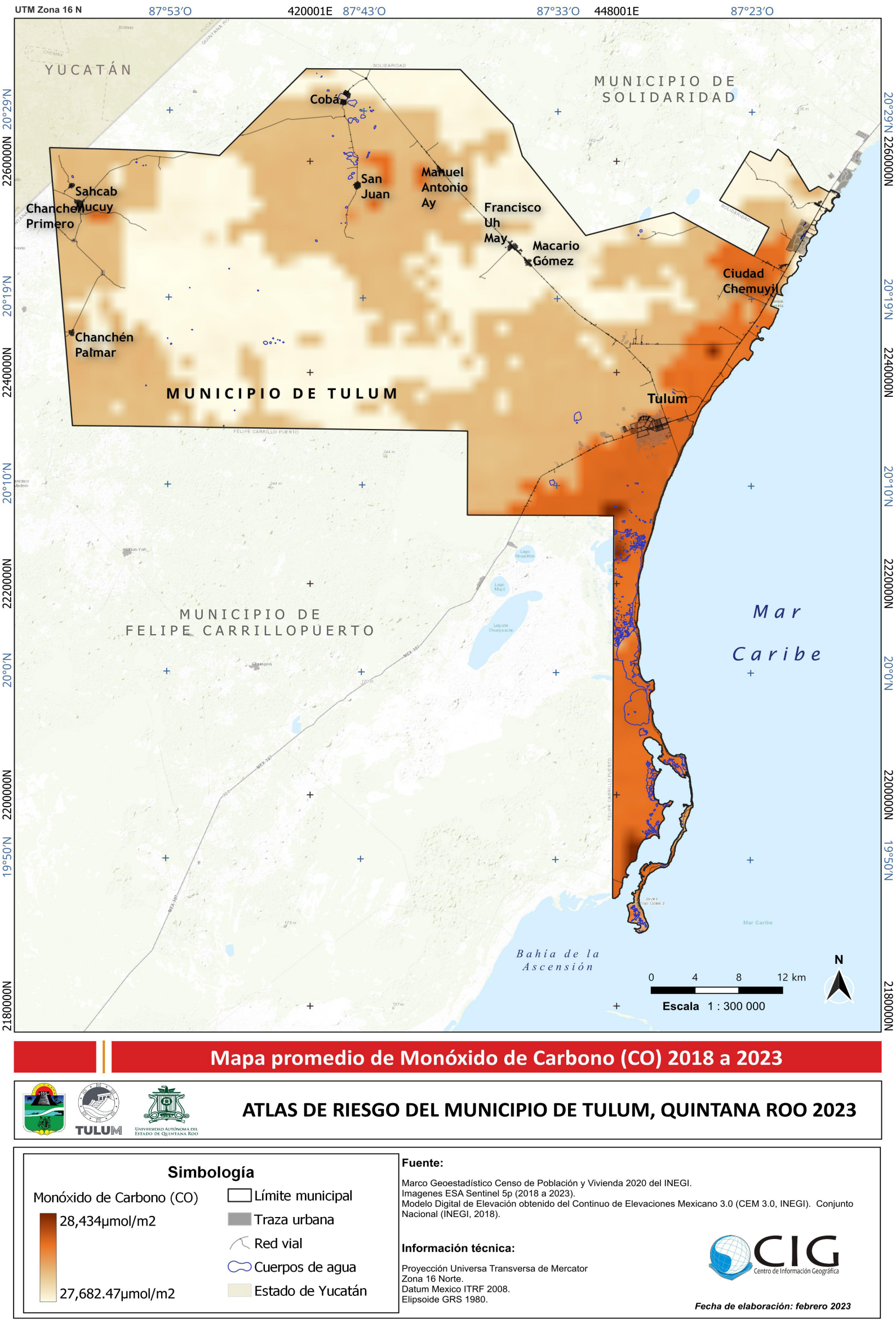
Fuente: Elaboración propia.

Para el monóxido de Carbono (CO) su distribución se muestra en la figura 9x, si bien en las imágenes originales la columna total de monóxido de carbono se mide en mol por metro cuadrado, estas se convirtieron a unidades de µmol/m².

El monóxido de carbono (CO) es un importante gas traza atmosférico. En ciertas áreas urbanas, es un contaminante atmosférico importante. Las principales fuentes de CO son la combustión de combustibles fósiles, la quema de biomasa y la oxidación atmosférica de metano y otros hidrocarburos.

Para Tulum la concentración de este gas se observa a todo lo largo de su línea de costa y sobre la carretera 307 (figura 228), a su interior disminuye, solo unas pequeñas áreas se muestran con mayor valor, lo cual se puede deber a la oxidación de CH4 (Metano). No obstante, se puede observar donde la selva no ha sido impactada y donde ya se tiene un grado de impacto, esto se puede deber a incendios forestales, quema de la biomasa. Por otra parte, la mayor concentración al Este del municipio puede deberse a la densidad de circulación de vehículos y actividades urbanas ya que una de las fuentes generadoras es la oxidación de hidrocarburos emitidos por el transporte y por los disolventes industriales. De la misma manera, cercano al litoral del municipio, una de las fuentes generadoras puede ser la congregación de algas y otras fuentes biológicas que aportan CO al agua que se libera a la atmósfera (figura 228).

Figura 228. Contaminación por Monóxido de Carbono (CO) de 2018 a 2023, Tulum.



Mapa promedio de Monóxido de Carbono (CO) 2018 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Monóxido de Carbono (CO)
28,434µmol/m2
27,682.47µmol/m2

Límite municipal
Traza urbana
Red vial
Cuerpos de agua
Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2018 a 2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

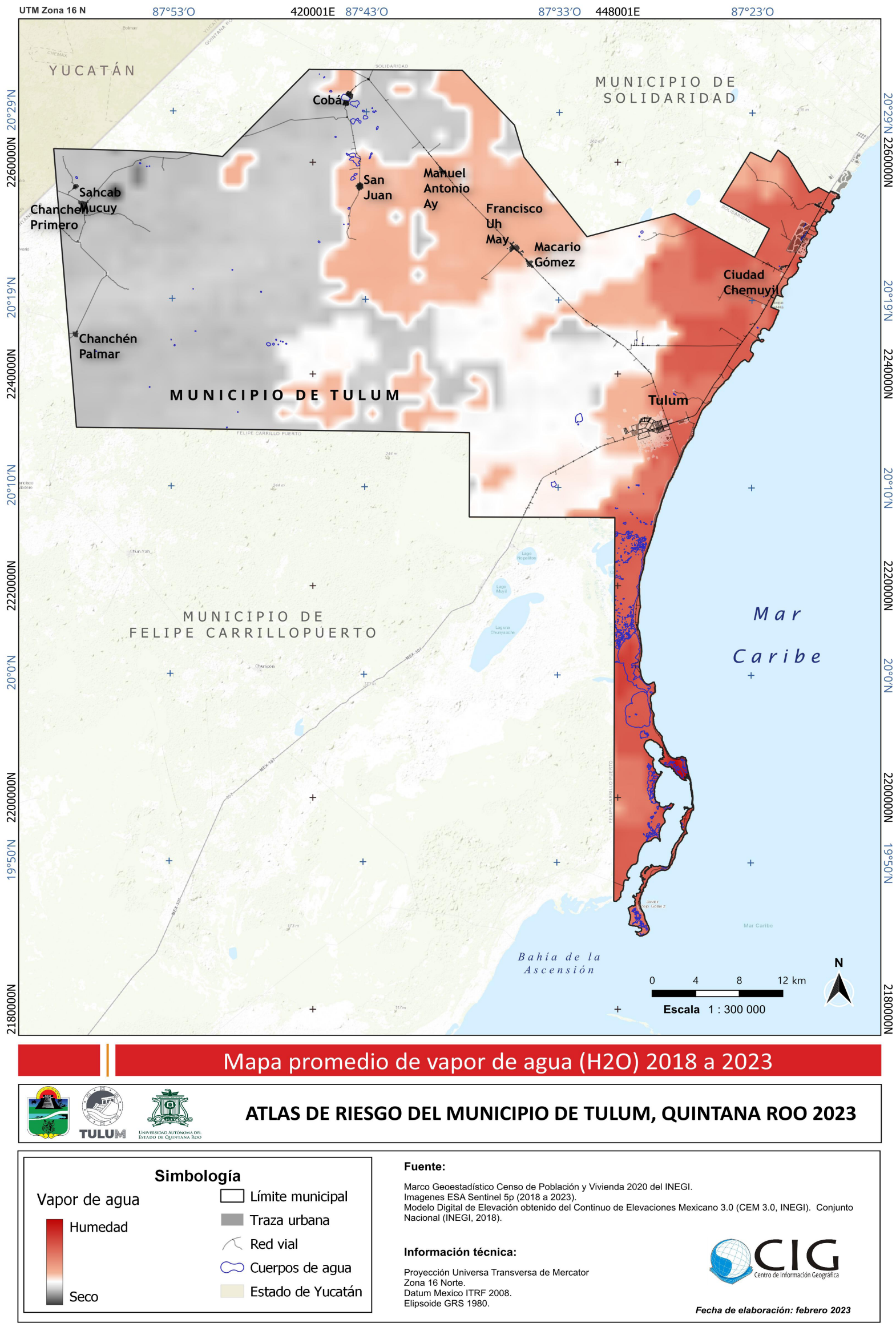
Ciertos gases en la atmósfera, como el vapor de agua y el CO2, absorben y vuelven a emitir energía infrarroja desde la atmósfera a la superficie de la Tierra. Este proceso, conocido como el efecto invernadero, hace que la temperatura superficial media sea 33°C más alta de lo que sería en ausencia de estos gases, sin el efecto invernadero, la temperatura media sería de -18°C (Dlugokencky, et al., 2016).

No obstante, son los gases de efecto invernadero que no son condensables o de larga duración (principalmente el CO2, además del metano (CH4), el óxido nitroso (N2O) y los halocarbonos) los que actúan como contribuyentes al efecto invernadero.

Como señalan Dlugokencky, et al. (2016) el vapor de agua y las nubes juegan el papel de respuesta rápida, lo que significa que el vapor de agua responde rápidamente a los cambios de temperatura, a través de la evaporación, la condensación y la precipitación. De hecho, el vapor de agua contribuye al efecto invernadero, pero es un gas de vida corta que se condensa y precipita. No es responsable de casi ningún sistema de calefacción.

En el municipio de Tulum los valores más altos para vapor de agua (humedad) se muestran cercanos a su litoral (figura 229). Las áreas rojas y rosa pálido muestran dónde la humedad está dejando la superficie y entrando a la atmósfera por evaporación; por el contrario, las áreas grises a negras muestran con se concentran menos vapor de agua.

Figura 229. Promedio de concentración del vapor de agua de 2018 a 2023, Tulum.



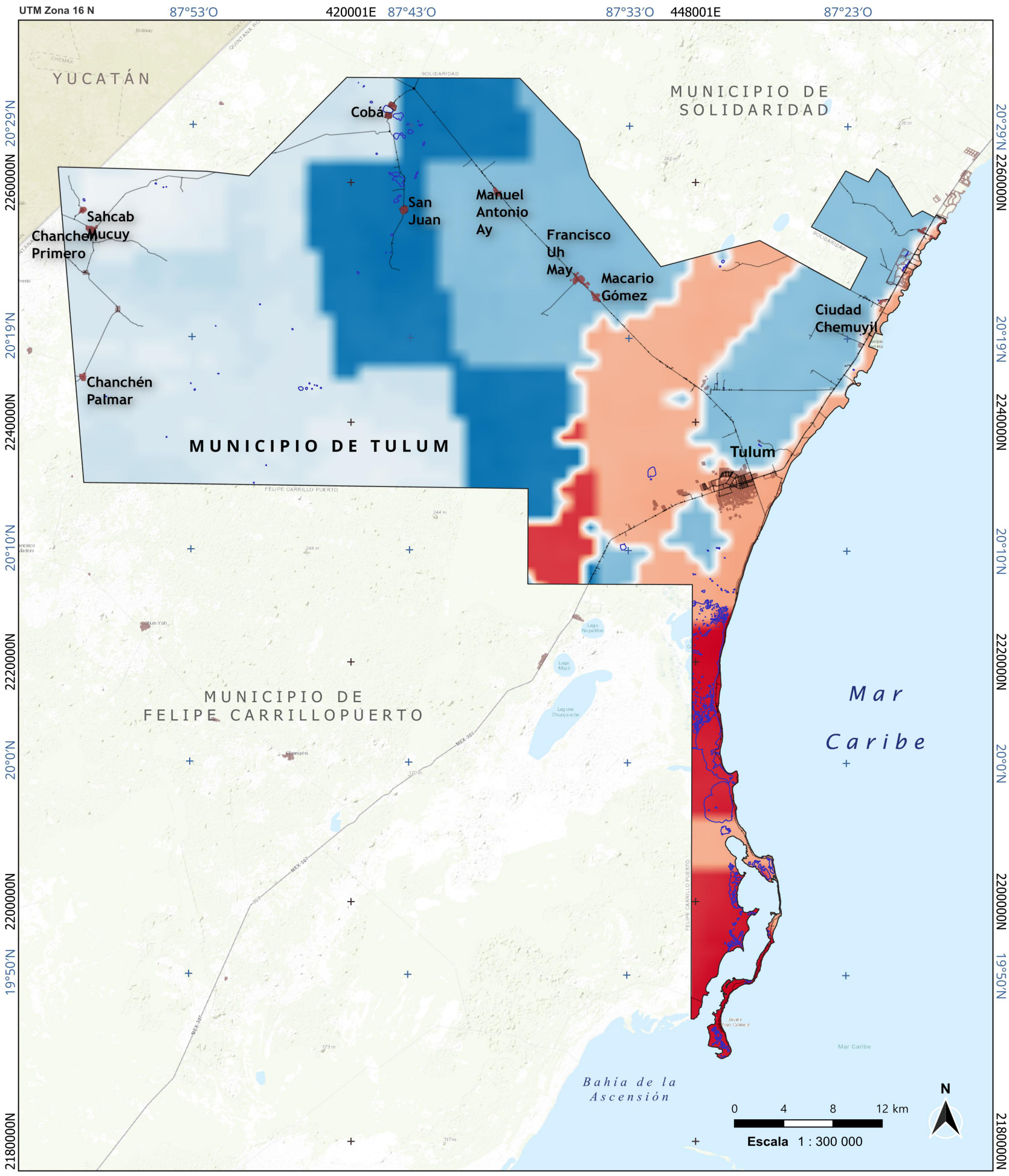
Fuente: Elaboración propia.

En cuando a los aerosoles, se muestra la media de prevalencia de aerosoles en la atmósfera del municipio de Tulum a través del Aerosol Index (AI), el cual es un índice cualitativo que indica la presencia de capas elevadas de aerosoles en la atmósfera (figura 230). Se puede utilizar para detectar la presencia de aerosoles que absorben los rayos ultravioletas, como el polvo del desierto y las columnas de cenizas volcánicas. Los valores positivos indican la presencia de aerosol absorbente de UV. Este índice se calcula para dos pares de longitudes de onda en unidades espectrales de nanómetros: 340/380 nm y 354/388 nm.

Para el municipio se obtuvieron valores negativos y la mayor concentración de estas partículas se localizó al sur del municipio, hacia Punta Allen, la siguiente en importancia sería la indicada en rosa pálido donde localiza la ciudad de Tulum y a lo largo de la carretera 307 (figura 230).

Su utilidad puede ser aprovechada para buscar la distribución de aerosoles casuales, principios de polvo en la atmósfera, cenizas volcánicas y quema de biomasa.

Figura 230. Concentración promedio del Índice de Aerosol, 2018 a 2023, Tulum.



Mapa del Índice de Aerosol (2018 a 2023)

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

AerosolTulum
-0.46 Alto
-1.48 Bajo

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Cuerpos de agua
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2018 a 2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

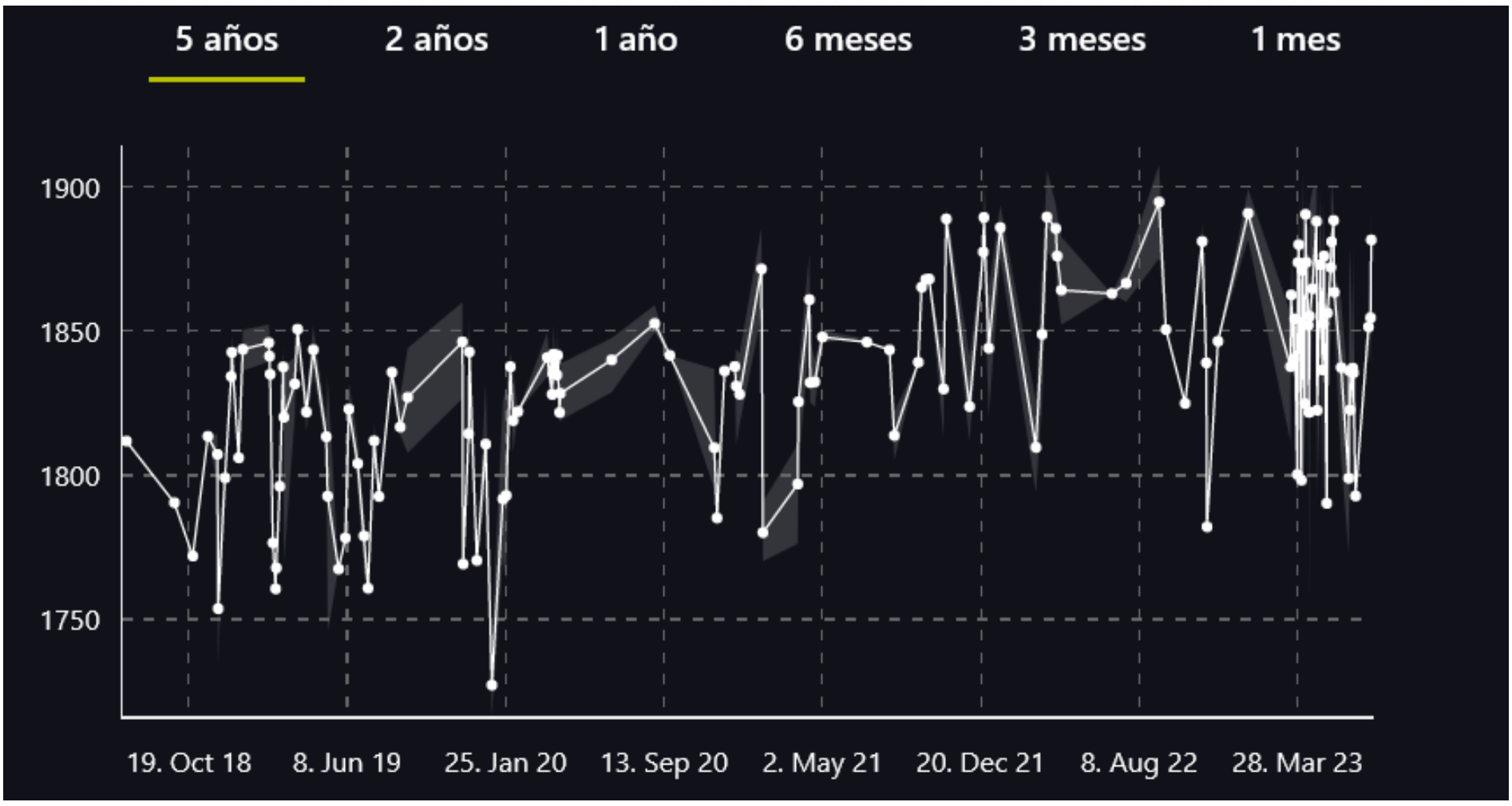
Posteriormente, con las imágenes del satélite Sentinel 5p, descargadas desde el EO Browser se procedió a la creación de la siguiente cartografía: Metano (CH4), Ozono (O3), Dióxido de azufre (SO_2) y Formaldehído (CH2O), correspondientes a las figuras 232, 234, 236 y 238.

El metano es, después del dióxido de carbono, el contribuyente más importante al efecto invernadero aumentado antropogénicamente (causado por la actividad humana). Los valores de medición se proporcionan en partes por billón (ppb) con una resolución espacial de 7 km x 3.5 km (24.5 km2).

En el municipio de Tulum se observa que el gas metano durante estos cinco años de análisis se concentró cerca de ciudad Chemuyil y Akumal, así como en el área de crecimiento de la ciudad de Tulum y en Manuel Antonio Ay (figura 232). Igualmente se observa valores cercanos a los 2000 ppb en la Laguna Campechén y disminuye en áreas al Este del municipio sin impacto y presencia humana. Lo anterior pudo deberse al incendio de julio de 2019 en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an por la acumulación de materia orgánica que en conjunto con el suelo kárstico y cavernas generó gas metano.

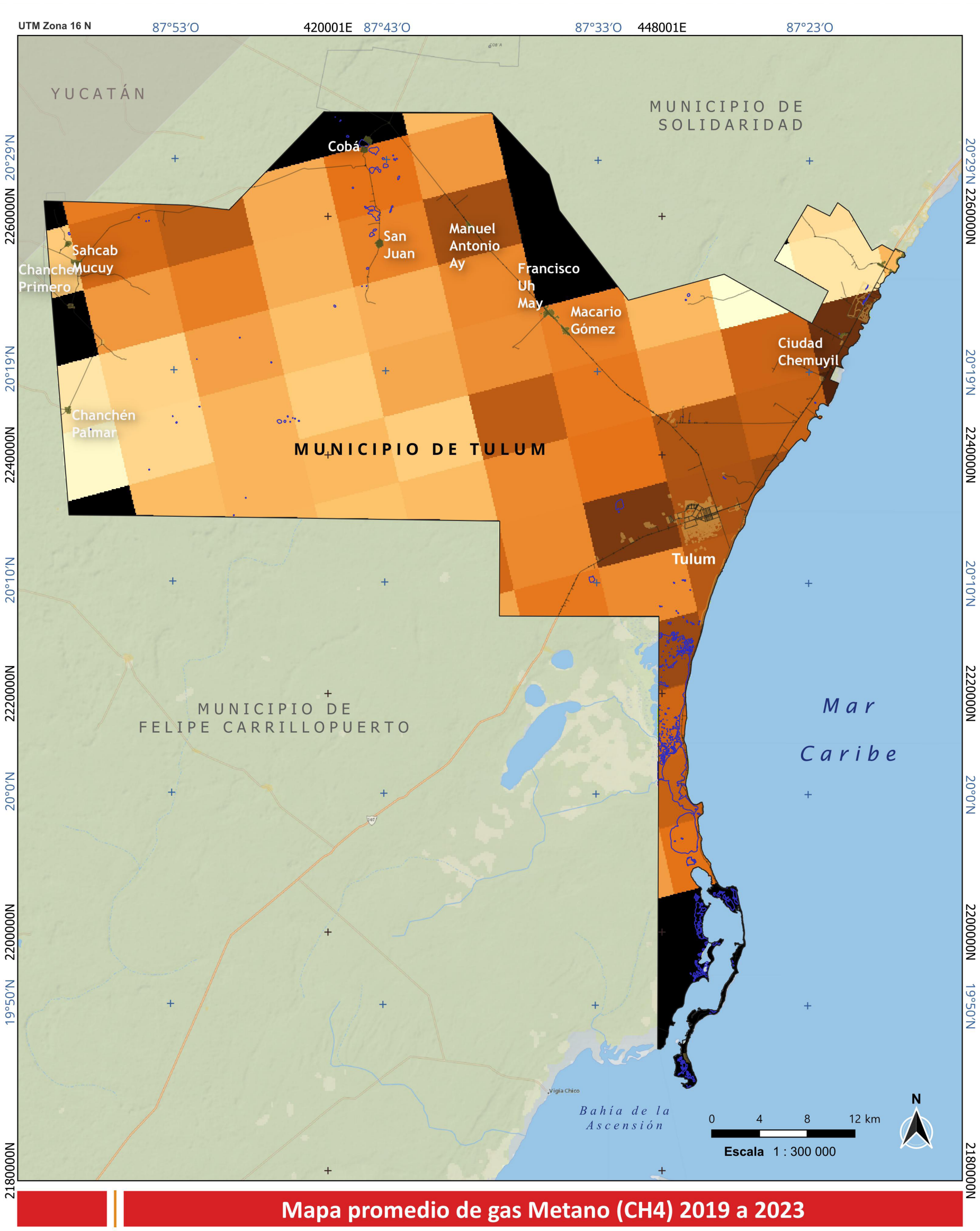
De la misma manera, en la gráfica 1x, podemos observar su generación y comportamiento para un periodo de cinco años, los valores tienen un descenso significativo en 2020, posiblemente al confinamiento por la pandemia de COVID-19. A finales de 2021 hasta la fecha se advierte un aumento en su generación, probablemente al fin de este confinamiento.

Figura 231. Gráfica de generación de Metano 2019 a 2023 Tulum.



Fuente: Elaboración propia desde EO Browser.

Figura 232. Concentración de gas Metano (CH4), 2019 a 2023, Tulum.



Mapa promedio de gas Metano (CH4) 2019 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Metano (CH4)
1,909(ppb)
1,852(ppb)
Sin dato

Límite municipal
Traza urbana
Red vial
Cuerpos de agua
Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2019 a 2023). Sentinel Hub EO Browser.
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

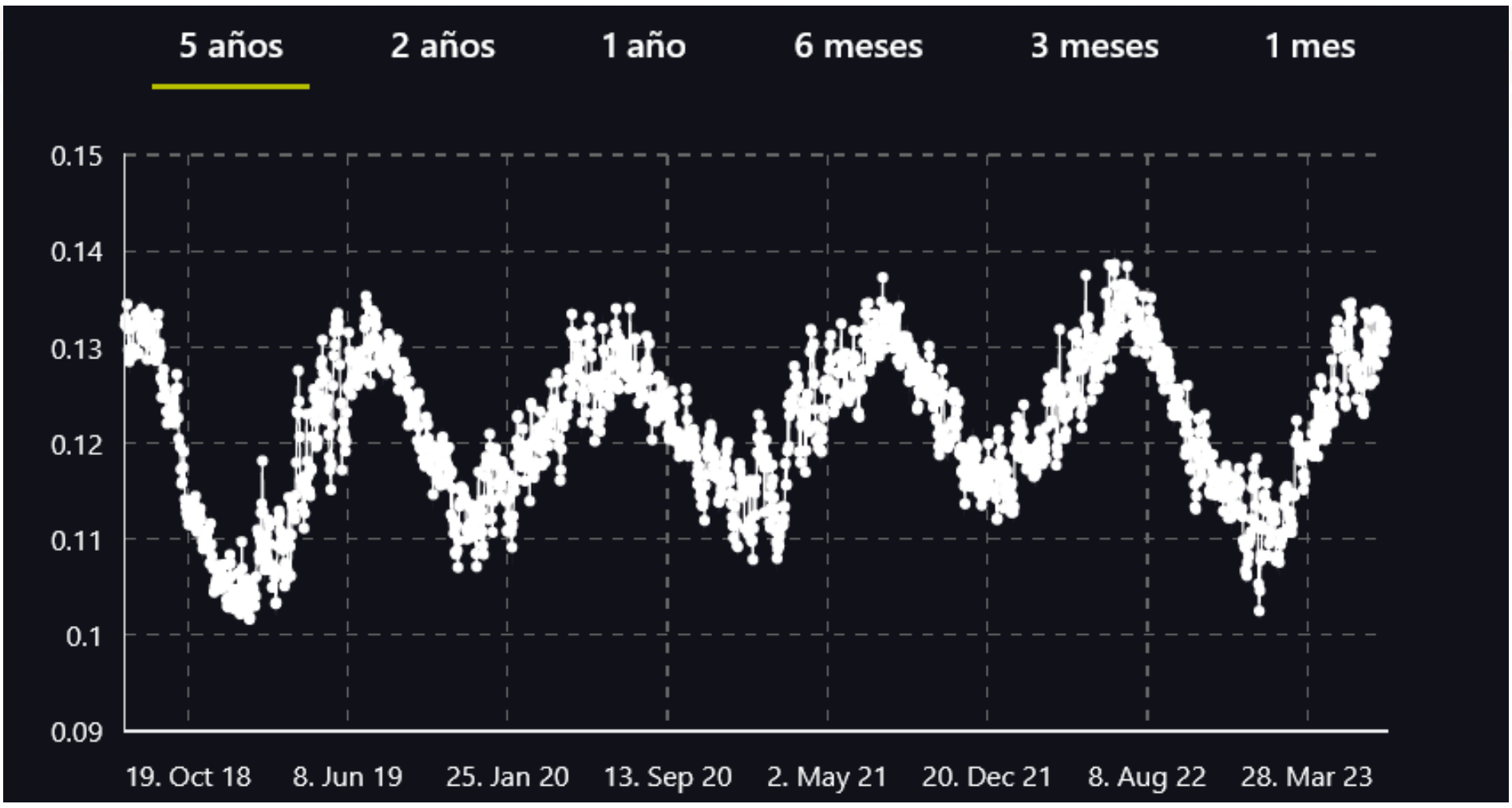
Fuente: Elaboración propia.

El ozono es valioso para el equilibrio de la atmósfera terrestre. La capa de ozono de la estratosfera protege la biosfera de la peligrosa radiación ultravioleta. En la troposfera, el ozono actúa como un agente limpiador muy eficaz, pero en concentraciones elevadas resulta perjudicial para la salud humana, de los animales y de las plantas. El ozono es, además, uno de los gases con una contribución significativa al efecto invernadero responsable del cambio climático. Desde el descubrimiento del agujero de ozono antártico en la década de 1980, posterior protocolo de Montreal, se regula la producción de sustancias cloradas destructoras de ozono, este gas se ha venido monitorizando de manera rutinaria tanto desde el suelo como desde el espacio.

Los valores obtenidos del análisis de Ozono se dan en moles por metro cuadrado (mol/ m^2).

En la figura 233 se observa el comportamiento fluctuante del O_3, como se puede ver cada año tiene variaciones de ascenso y descenso, el cual ha sido más espaciado entre 2019 y 2021.

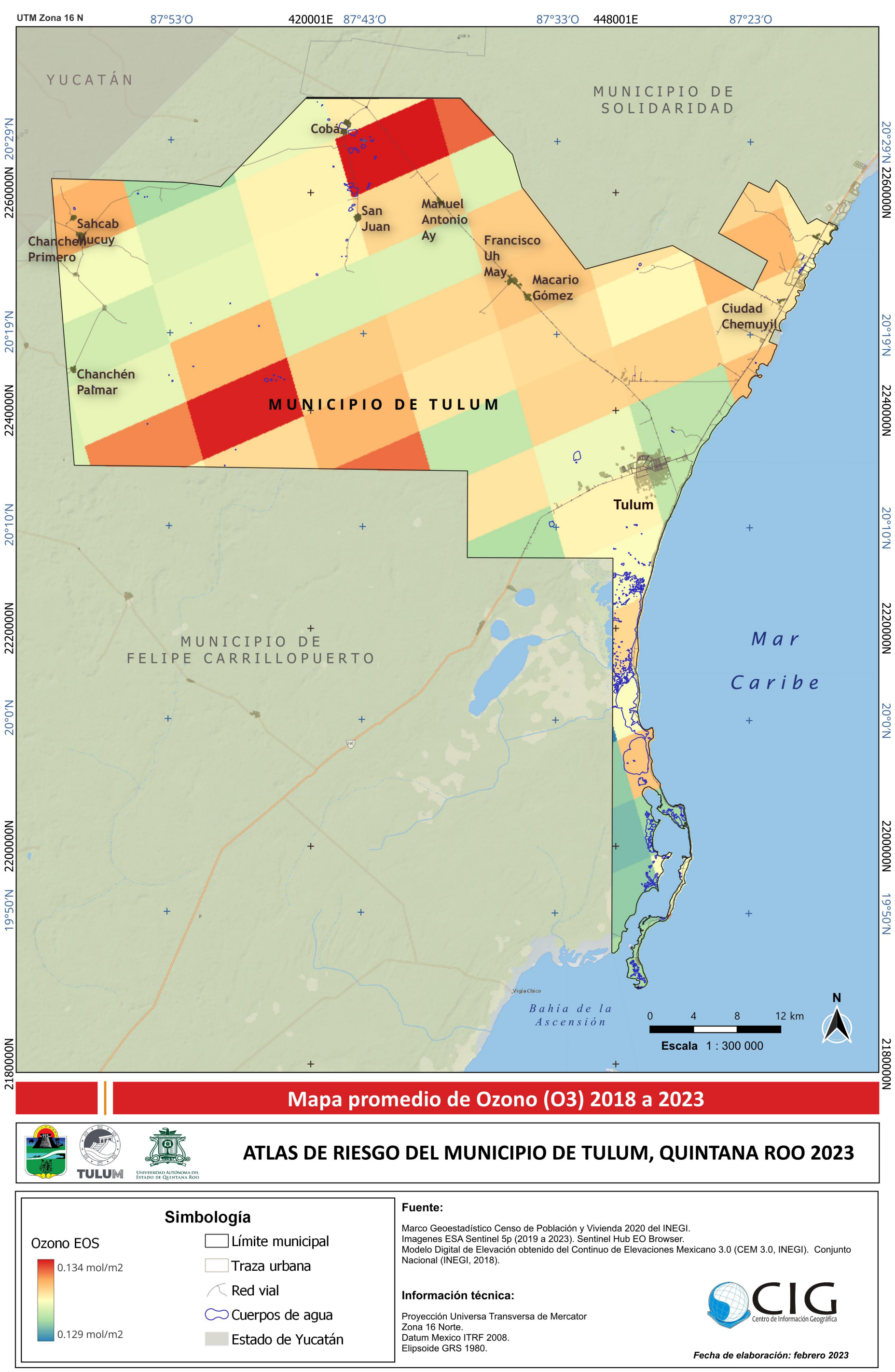
Figura 233. Gráfica de generación de Ozono 2018 a 2023 Tulum.



Fuente: Elaboración propia desde EO Browser.

El ozono troposférico se forma cuando los gases contaminantes, como los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, reaccionan con la luz solar. El ozono troposférico es un irritante respiratorio que puede causar problemas de salud como asma, bronquitis y neumonía. También puede dañar las plantas y los cultivos. Para el municipio de Tulum en la figura 13x se observa que cerca de la localidad de Cobá y hacia el sur se ha producido para ese periodo de tiempo valores de gas ozono de 0.134 mol/m2. El resto del municipio se queda con cantidades medias o mínimas.

Figura 234. Concentración de Ozono (O_3), 2018 a 2023, Tulum.



Mapa promedio de Ozono (O3) 2018 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

TULUM

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo

Simbología

Ozono EOS

0.134 mol/m2

0.129 mol/m2

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Cuerpos de agua
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2019 a 2023). Sentinel Hub EO Browser.
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

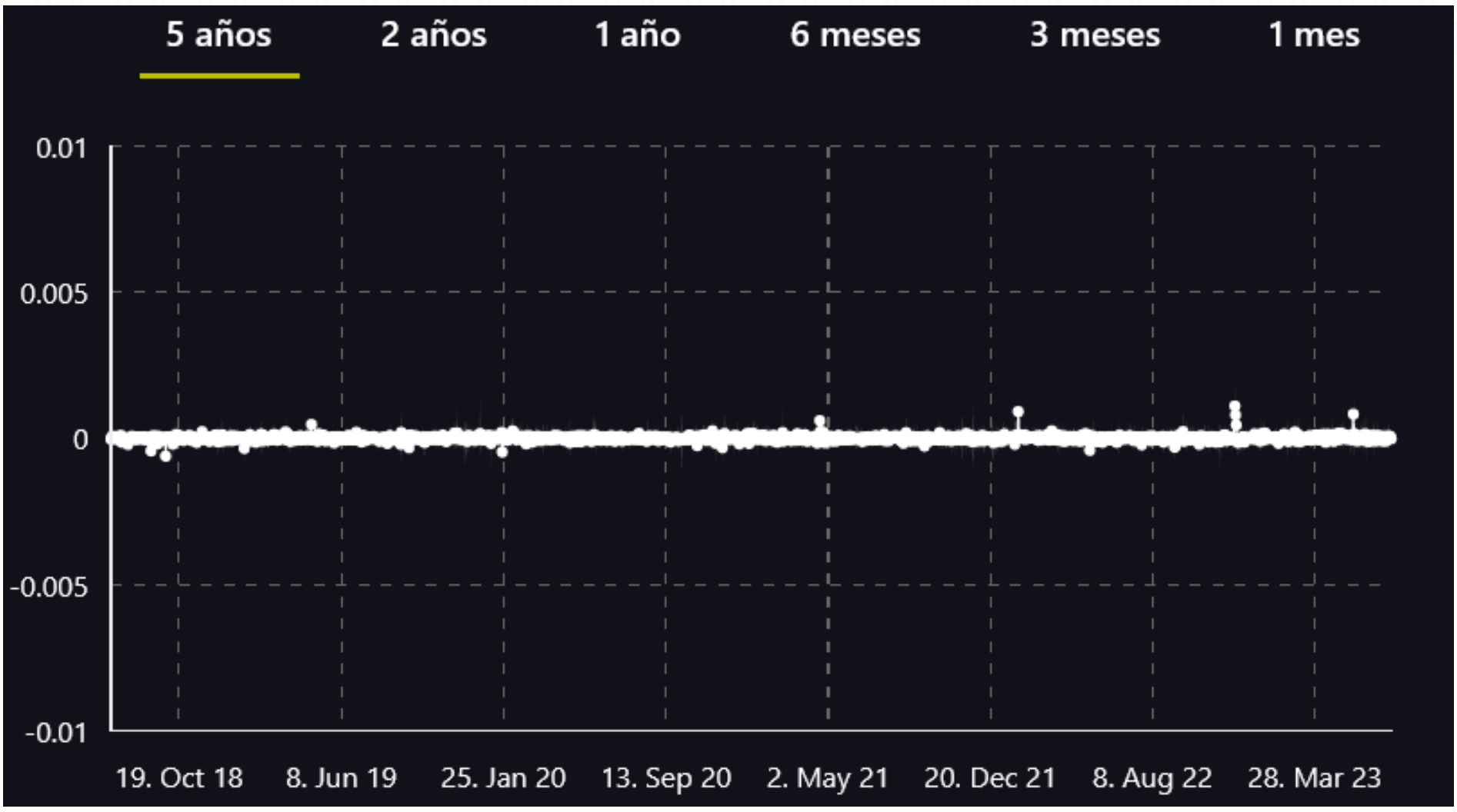
CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

El dióxido de azufre (SO_2) cuando se combina con el agua en la atmósfera, forma ácido sulfúrico, que puede causar lluvia ácida. La lluvia ácida puede dañar los árboles, los cultivos y los ecosistemas acuáticos. También puede corroer los materiales de construcción, como los metales y los ladrillos. El SO2 se libera a la atmósfera principalmente por la combustión de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural. También puede ser liberado al aire por la actividad volcánica y por la industria. En el municipio de Tulum no se existen volcanes ni grandes industrias, por lo que la producción de este gas es mínima o insignificante para dañar el aire o la salud humana, como se puede observar en la gráfica 235.

Figura 235. Gráfica de generación de Dióxido de Azufre 2018 a 2023 Tulum.

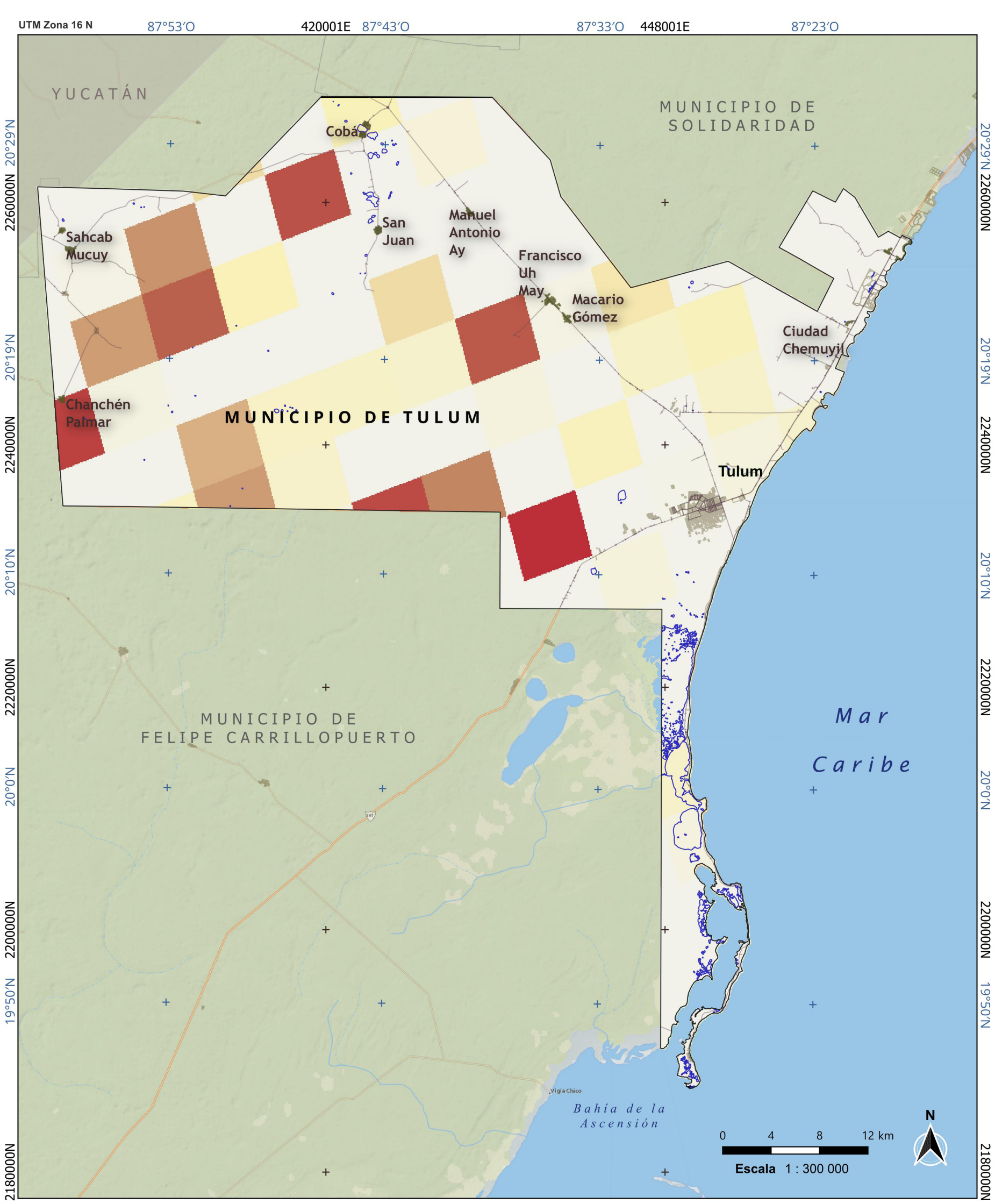


Fuente: Elaboración propia desde EO Browser.

El dióxido de azufre accede a la atmósfera terrestre mediante procesos naturales y antropogénicos (causados por el ser humano). Tiene relevancia química a nivel local y global y su incidencia abarca desde contaminación de corta duración hasta efectos en el clima. Solo alrededor del 30% de las emisiones de SO2 procede de fuentes naturales; la mayoría es de origen antropogénico. El instrumento TROPOMI de Sentinel-5P muestrea la superficie terrestre a intervalos de un día con una resolución espacial de 3.5 x 7 km, lo que permite distinguir detalles finos que incluyen áreas reducidas de SO2. Los valores obtenidos se dan en moles por metro cuadrado (mol/ m2).

Como se observa en la figura 14x, en el municipio de Tulum es mínima la generación de este gas, siendo solamente su valor máximo de 0.004 mol/m2, principalmente en áreas hacia el sur de su territorio poco impactadas por el hombre, lo que se supone se produce de una manera natural.

Figura 236. Concentración de Dióxido de Azufre (SO2), 2018 a 2023, Tulum.



Mapa promedio de Dióxido de Azufre (SO2) 2018 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Dióxido de azufre (SO2)

0.0004 mol/m2

0 mol/m2

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Cuerpos de agua
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2018 a 2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

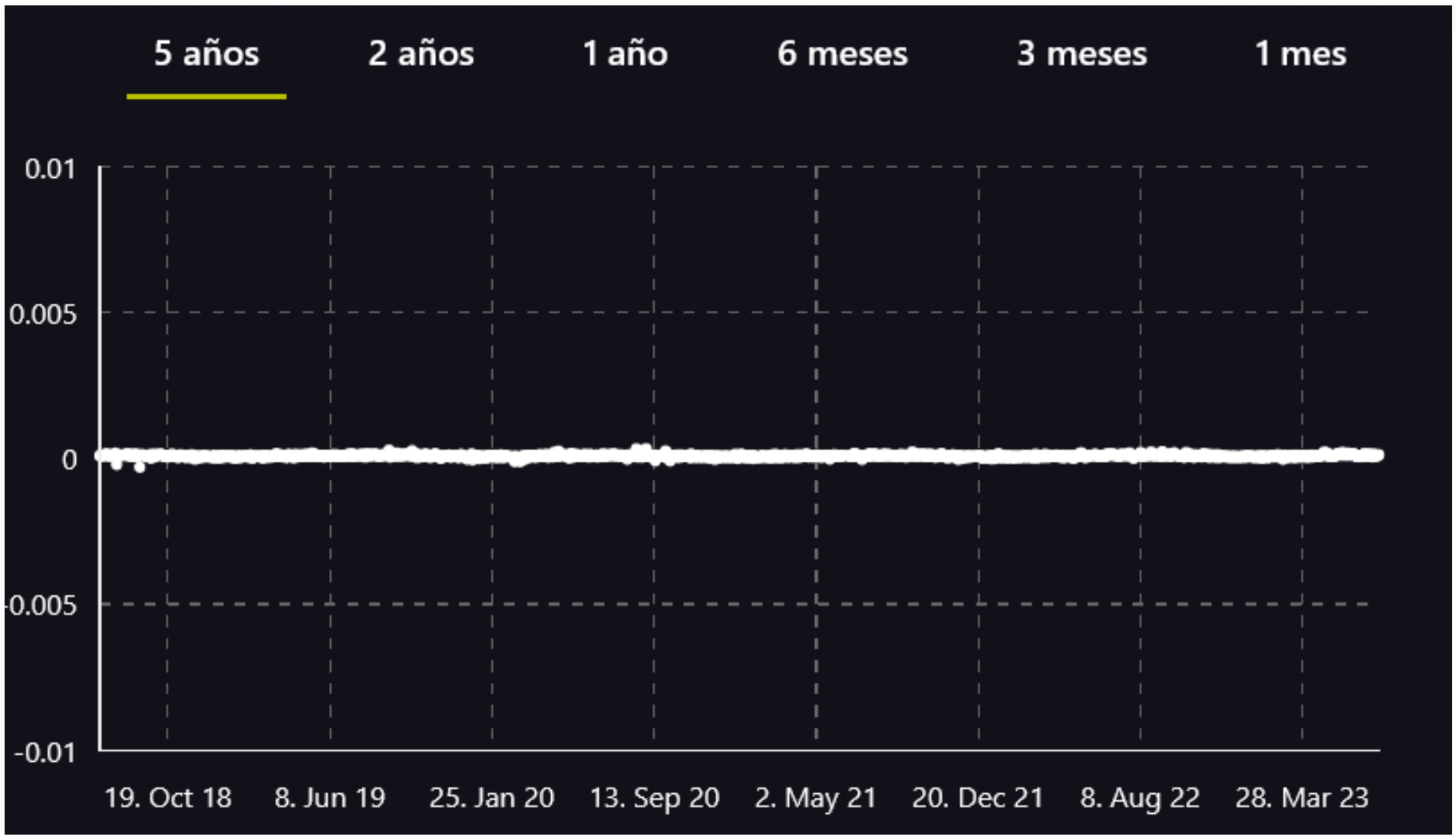
Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

Las observaciones satelitales a largo plazo del formaldehído (CH_2O) son esenciales para los estudios de la calidad del aire y de la interdependencia entre la química y el clima, tanto a escala regional como global. Las variaciones estacionales e interanuales de la distribución de formaldehído se relacionan, sobre todo, con cambios de temperatura y con incendios, pero también con cambios antropogénicos (debidos a la actividad humana). La vida del formaldehído en la atmósfera asciende a apenas unas cuantas horas, por lo que cabe relacionar directamente su concentración en la capa límite con la emisión de hidrocarburos de vida corta, los cuales no suelen ser detectables desde el espacio. Las medidas se dan en moles por metro cuadrado (mol/ m^2).

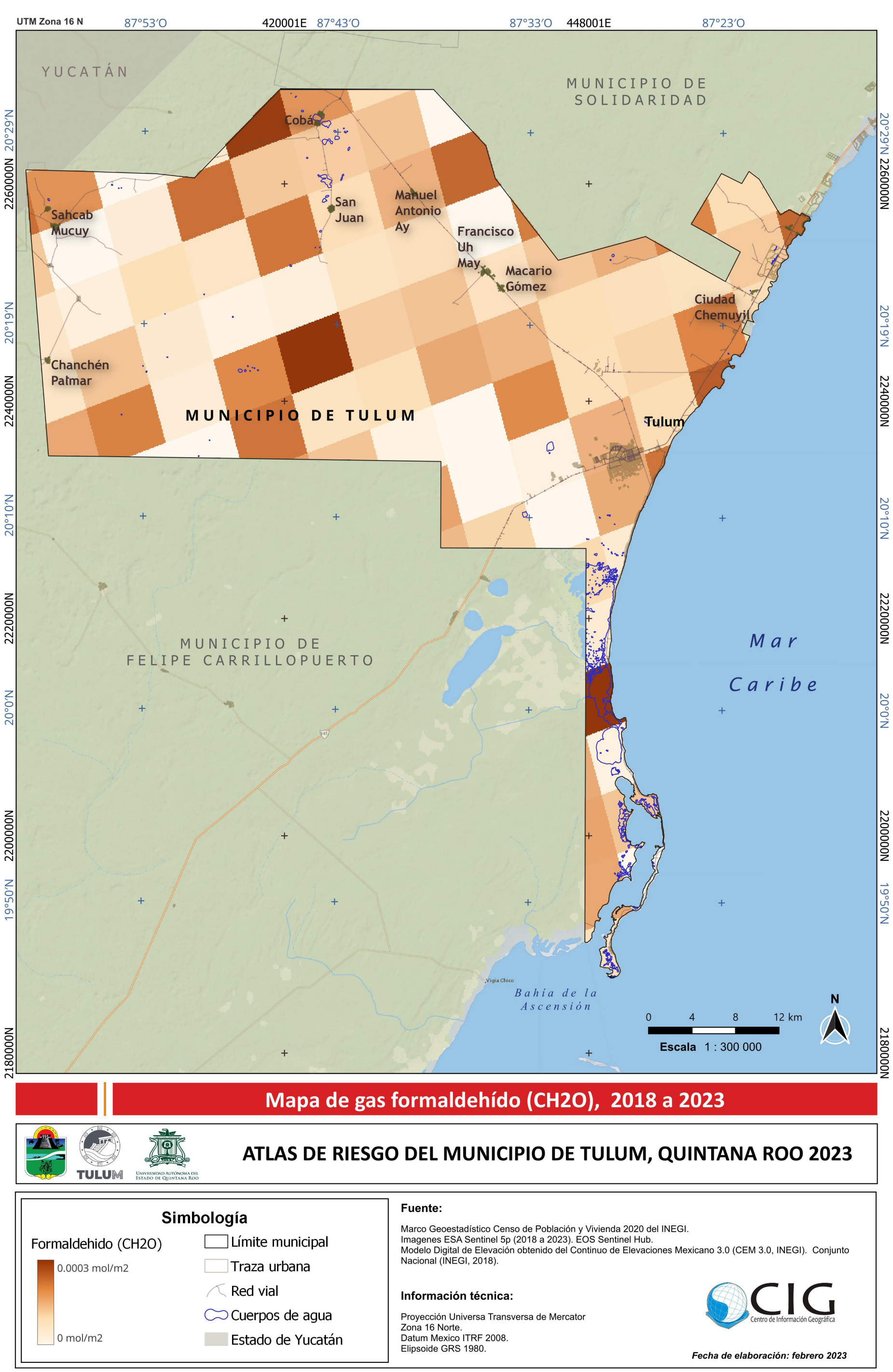
Es un subproducto de la combustión incompleta de materia orgánica y también se puede producir de forma natural en el medio ambiente. El formaldehído es un contaminante del aire peligroso que puede causar una variedad de problemas de salud, incluyendo irritación de los ojos, la nariz y la garganta, problemas respiratorios, cáncer y daños al ADN. Sin embargo, para el municipio a lo largo de 5 años sus valores son mínimos, sin detección significativa de este gas (figuras 237 y 238).

Figura 237. Gráfica de generación de Formaldehído (CH_2O) 2018 a 2023 Tulum.



Fuente: Elaboración propia desde EO Browser.

Figura 238. Concentración de Formaldehído (CH2O), 2018 a 2023, Tulum.



Mapa de gas formaldehído (CH2O), 2018 a 2023

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

Formaldehido (CH2O)

0.0003 mol/m2

0 mol/m2

- Límite municipal
- Traza urbana
- Red vial
- Cuerpos de agua
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 5p (2018 a 2023). EOS Sentinel Hub.
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

Agua

El agua es un solvente universal por lo que nunca será pura en la naturaleza. El agua, en su ciclo natural, atraviesa la atmósfera y el suelo, transportando y disolviendo sus componentes. El agua se puede clasificar según su:

Localización:

- Superficial: está en la superficie (ríos, pantanos...).
- Subterránea o profunda: de los acuíferos (una gran masa de agua debajo de la tierra)
- Freática: capa más superficial del acuífero.
- De fuentes o pozos
- Lacustre: de los lagos
- De infiltración: lluvia que se filtra en el suelo y alimenta los acuíferos subterráneos
- De lixiviado: agua de lluvia que lava el suelo o las hojas de los árboles
- Marina: agua de mar (océanos)
- Pluvial: agua de lluvia

Utilización:

- Potable: destinada al consumo humano
- Industrial: la que se usa en los procesos industriales
- Residual: la que procede de las actividades humanas (domésticas, comerciales, e industriales).
- Tratada: la que ha sido sometida a tratamientos de purificación.
- Cruda: la que no ha sido sometida a tratamientos de purificación

Composición:

- Pura: H_2O
- Dulce: menos de 1000 mg l-1 de sales o sólidos totales disueltos.
- Salobre: 1000 a 10000 mg l-1 de sales
- Salada: 10000 a 100000 mg l-1 de sales
- Natural: agua cruda, tal y como se encuentra en el recurso del que procede (sin contaminar)
- Destilada: sometida a un proceso de destilación con muy baja conductividad
- Mineral: la de los yacimientos subterráneos. También puede ser agua potable a la que se han añadido sales minerales permitidas por la ley.
- Dura: rica en Ca^{2+} y Mg^{2+}.
- Blanda: pobre en Ca^{2+} y Mg^{2+}.
- Pútrida: en la que se están descomponiendo sustancias orgánicas

El agua incluso en zonas limpias donde no hay contaminación, el agua natural tiene muchísimos componentes, tanto inorgánicos como orgánicos:

SUSTANCIAS INORGÁNICAS (procedentes del suelo y del agua de lluvia)

SUSTANCIAS ORGÁNICAS (procedentes de la descomposición de la biomasa)

Existen cuatro fuentes principales de contaminación antropogénica: la industria (dependiendo del tipo de industria se desprenderán unos contaminantes u otros), los residuos sólidos urbanos (RSU), principalmente transportan contaminantes orgánicos, la navegación (muy importante en la contaminación por hidrocarburos), la agricultura y ganadería, que contaminan el agua a través de pesticidas, fertilizantes y materia orgánica de animales y plantas.

Todas estas fuentes de contaminación modifican algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del agua. Las propiedades alteradas por contaminantes (tabla 114) son en realidad parámetros medidos en el agua para determinar su calidad.

Tabla 114. Parámetros del agua que pueden ser alterados por contaminantes.

Físicas	Químicas	Biologicas
Color	pH	
Olor y sabor	O2 disuelto (OD)	Bacterias coliformes
Conductividad	DBO5, DQO, COT	Virus
Temperatura	Nitrógeno total	Microorganismos
Materiales en suspensión	Fósforo total	Animales
Radiactividad	Aniones	Plantas
Espumas	Cationes	
	Metales pesados	
	Compuestos orgánicos	

Fuente: Encinas (2011).

Las substancias contaminantes del agua provienen de residuos, fundamentalmente orgánicos que se oxidan fácilmente por las acciones de bacterias aerobias, las cuales provienen de las siguientes fuentes: aguas domésticas, desechos de industrias alimentarias, desperdicios de industrias papeleras, subproductos de operaciones de curtido, efluentes (salidas de agua) de mataderos y plantas empaquetadoras de alimentos. Por otra parte, los efectos pueden implicar la muerte de la vida microscópica aerobia y macroscópica.

También existen agentes patógenos que contribuyen a la contaminación del agua como las bacterias, virus, protozoos. Entre las fuentes principales se encuentran las heces y restos orgánicos de personas infectadas.

El agua puede contaminarse debido a varias sustancias orgánicas o inorgánicas, por ejemplo:

Compuestos orgánicos sintéticos

Esto es petróleo, gasolina, plástico, pesticidas, solventes, detergentes, compuestos farmacéuticos. Este tipo de contaminante permanecen mucho tiempo en el agua, porque son productos sintéticos, tienen la estructura molecular muy compleja que exhiben los microorganismos en el agua no pueden degradarse.

Fuentes

- Aguas industriales y municipales
- Aguas de escorrentía
- Agua de precipitación

Sustancias químicas inorgánicas

Se clasifican en esta partida los ácidos inorgánicos, las sales inorgánicas y los metales tóxicos como Hg (mercurio) y Pb (plomo).

Fuentes

- Ácidos minerales: drenaje de las minas de hierro y lluvia ácida.
- Sales inorgánicas: vertidos, infiltración del mar, utilización de sal para eliminar la nieve.
- Metales pesados: minería, siderurgia, corrosión de materiales metálicos, erosión.

Efectos

- Aumento de la acidez por los ácidos minerales.
- Aumento de la salinidad por las sales inorgánicas.
- Aumento de la toxicidad por metales pesados.

Sedimentos y materiales suspendidos

Se refiere a las partículas que se expelen del suelo y flotan en el agua y la vierten de partículas. Son los que más contribuyen a la masa total de contaminante en el agua.

Fuentes

- Natural: erosión.

Efectos

- Desbordamientos y daño de animales acuáticos.
- Reducción de luz y aumento de la turbidez

Para detectar los niveles de contaminación del agua entubada, cuerpos de agua, ríos, cenotes se deben estimar índices de calidad, los cuales son valores (datos numéricos) que califican la calidad del agua, independientemente del uso que se le vaya a dar. Los índices de calidad pueden ser químicos o biológicos. Por lo que para obtenerlos se deben aplicar técnicas variadas para cada clasificación del agua.

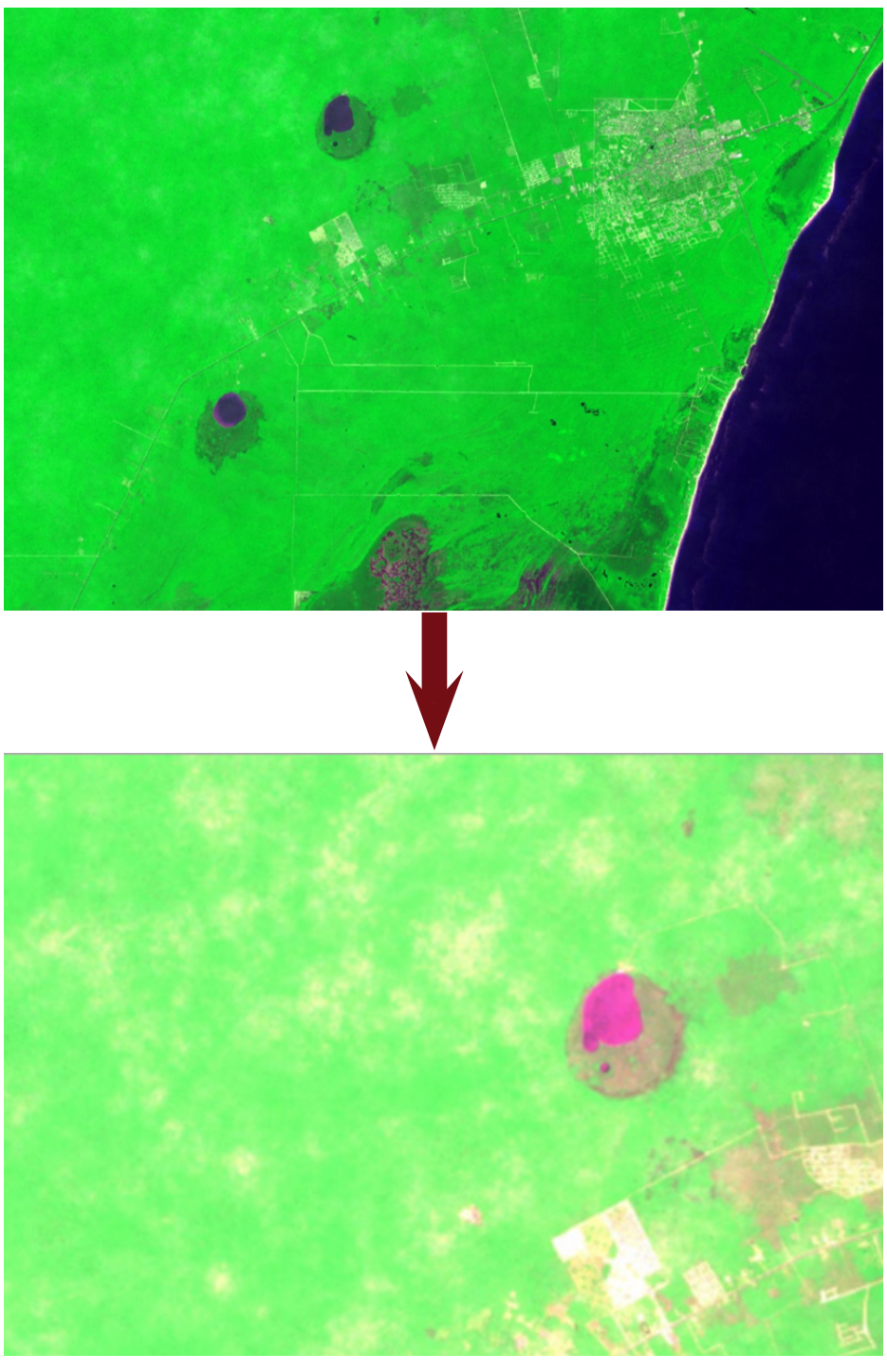
5.5.1.5. Metodología

Para identificar sedimentos al interior del municipio de Tulum se emplearon imágenes de satélite, ya que puede resultarte más fácil de visualizar y localizar la búsqueda de sedimentos y sólidos en suspensión. Las actividades y fenómenos naturales como la deforestación, las inundaciones o los movimientos producidos por las corrientes oceánicas tienen el potencial de movilizar la masa observable de sedimentos y algas cuando se trabaja además de los componentes RGB de color natural de la naturaleza e incluso con los tradicionales filtros de pseudocolor.

Se utilizó como proceso metodológico Google Earth Engine, el cual, aplicando scripts (códigos de programas) se pudo acceder a la identificación de sedimentos incrementando la proporción de contrastes de color en algunas bandas puede generar una imagen a falso color completamente diferente a la original y con mayor capacidad de análisis.

Para poder identificar los sólidos en suspensión, uno de los efectos más interesantes lo dan las bandas del NIR y el azul y rojo visible. Por lo que se realizó una combinación de RGB 482 (para Sentinel 2A, figura 239) alterando el orden habitual de bandas puede ser interesante para comenzar a visualizar los sólidos y sedimentos. De esta forma, la banda NIR resaltará el verde de la vegetación y los cuerpos de agua aparecerán en un tono verde oscuro. Los sólidos disueltos tendrán un sutil color marrón. Se realzaron las masas vegetales en tonos verdes desde un segundo plano. Una proporción de pesos entre bandas puede estar en un 50% para el canal rojo, 30% para el azul y 20% para el NIR. Es decir, se multiplican BANDA 4 x 5, BANDA 8 x 2 y BANDA 2 x 3 (figura 239).

Figura 239. Combinación de color RGB 482 para identificar suspensión sólidos

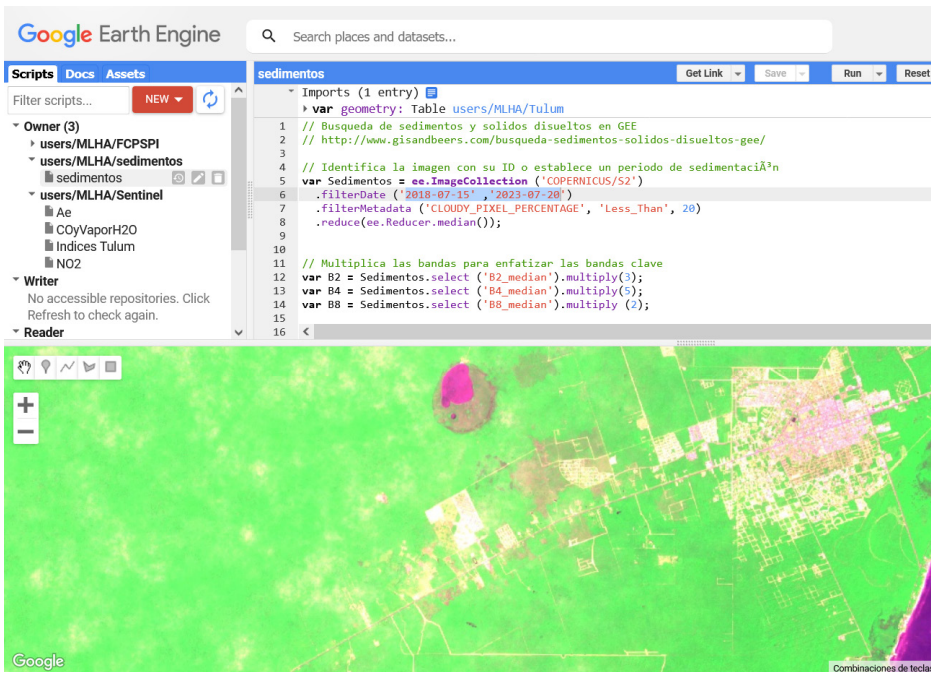


Fuente: Elaboración propia

5.5.1.6. Memoria de cálculo

- **Primer paso** se acceso al entorno de trabajo de *Google Earth Engine* (GEE)
- **Segundo paso** se señala la zona de interés (municipio de Tulum)
- **Tercer paso** se corre el script para el cálculo definiendo las fechas de análisis (temporalidad) las cuales fueron de 2018-07-15 a 2023-07-20.
- **Cuarto paso** una vez has ajustado la fecha temporal y el área de interés se corre el script.
- El resultado se muestra en el visor
- Para descargar la información se debe acceder a la pestaña Task donde se observa el listado de todas las capas disponibles para descargar.
- Finalmente, ejecutando el botón Run se comenzarán a descargar los datos en formato GeoTIFF y quedan archivados en Google Drive.
- Se realiza la cartografía correspondiente en un software de SIG.

Figura 240. Entorno de trabajo GEE.

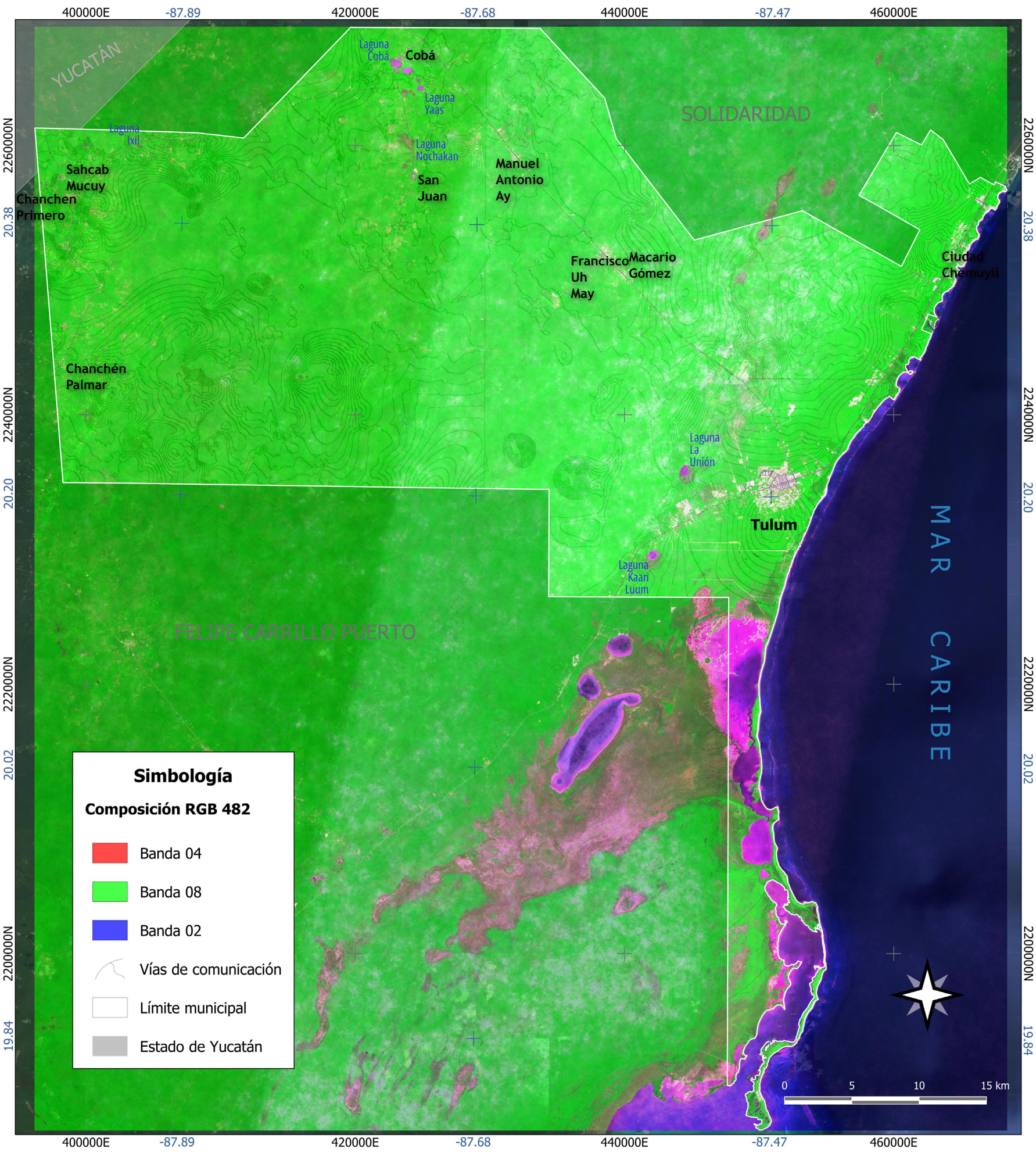


Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se procedió a realizar el mapa del territorio municipal, donde podemos identificar claramente los cuerpos de agua en tonalidades lilas y moradas, los sedimentos y solidos suspendidos pueden ser visibles en tonos marrones, siendo más significativos en los cuerpos de agua dentro de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Lagunas Unión, Kaan Luum, al sur, Lagunas Cobá, Yaas, Nochakan, Ixil al noroeste (figura 241).

5.5.1.7. Mapas resultantes de sedimentos

Figura 241. Promedio de sedimentos y sólidos disueltos (2018-2023).



Fuente: Elaboración propia

También se calcularon para esta sección de contaminantes el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo). Estos índices ambientales forman parte del contexto ambiental complementario para el análisis de riesgo del municipio de Tulum.

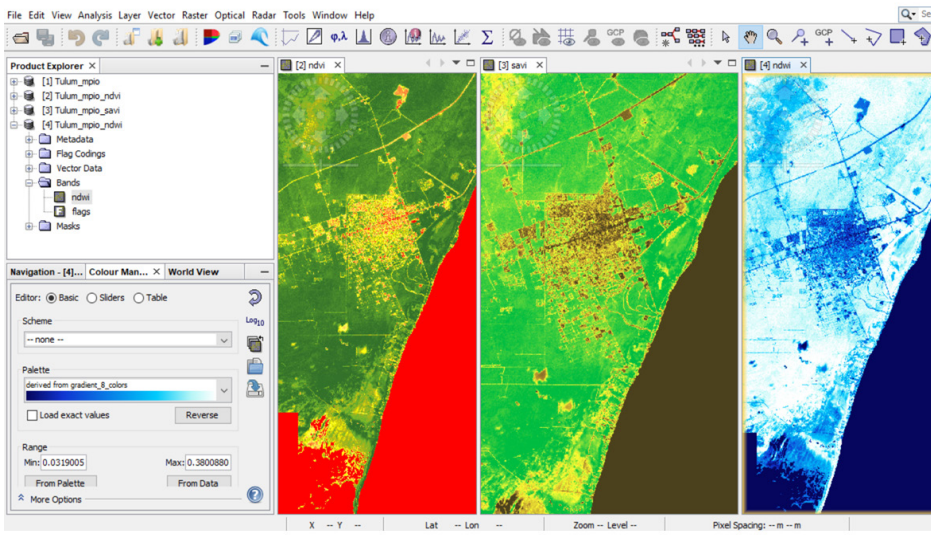
El primero su uso principal es detectar y controlar los cambios leves en la cantidad de agua de las masas de agua. Del segundo, mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. Por último, el tercero, se utiliza para el análisis de cultivos, para regiones áridas con vegetación escasa y superficies expuestas del suelo.

5.5.1.8. Metodología

Para el cálculo de estos índices se utilizó el software SNAP (Sentinel Application Platform) el cual es un software que permite descargar de manera gratuita, analizar y visualizar los datos obtenidos de los diferentes satélites Sentinel. Se emplearon imágenes de Sentinel 2A.

A través de SNAP, después de la descarga de imágenes se procedió al calculó de los índices NDWI, NDVI y SAVI con fecha de julio 2023 (figura 242). Posterior a estos procedimientos, se realizaron los mapas correspondientes los cuales se muestran en las figuras 1xx, 2xx y 3xx.

Figura 242. Uso del software SNAP para cálculo de índices ambientales



Fuente: Elaboración propia

5.5.1.9. Memoria de cálculo

- **Primer paso** se acceso al entorno Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home) para la descarga de las imágenes: Sentinel 2A, julio 2023, 10m/pix.
- **Segundo paso** para poder realizar operaciones entre bandas es necesario que todas las bandas posean la misma resolución espacial. Por esto, realizamos un resampling o remuestreo.
- **Tercer paso** se hacer el corte para el área de interés (municipio de Tulum)
- **Cuarto paso** se abren las imágenes en falso color Open RGB Image Window.
- **Quinto paso** desde el menú se accede al cálculo de los Índices espectrales con la opción Optical – Thematic Land Proccesing y allí se elige qué tipo de variable queremos observar en la superficie. Por ejemplo, para el caso del NDVI, seleccionarlo dentro de la categoría de índices de vegetación (Vegetation Radiometric Indices – NDVI/Processor).
- **Sexto paso** desde la pestaña "Processing Parameters" se indica qué bandas utilizaremos para calcular este índice. En este caso, para calcular NDVI solicita ingresar la banda Roja e Infrarroja (NIR), ya que la fórmula para el cálculo de este índice es la siguiente: NDVI = (NIR – R) / (NIR + R), SAVI = ((NIR – RED) / (NIR + RED + L)) * (1+L) y NDWI = (GREEN-NIR)/(GREEN+NIR)
- **Séptimo paso** para Sentinel 2A, como banda roja utilizamos la banda 4 y la banda 8 para el infrarrojo cercano o NIR. Hacemos click en Run y se lleva a cabo el proceso.
- **Octavo paso** ya generado el calculo se procede a seleccionar la imagen a exportar y luego debemos ir a Archivo – Exportar y elegir el formato de salida. En este caso fue en, "GeoTIFF".

5.5.1.10. Mapas resultantes de agua y suelo

Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

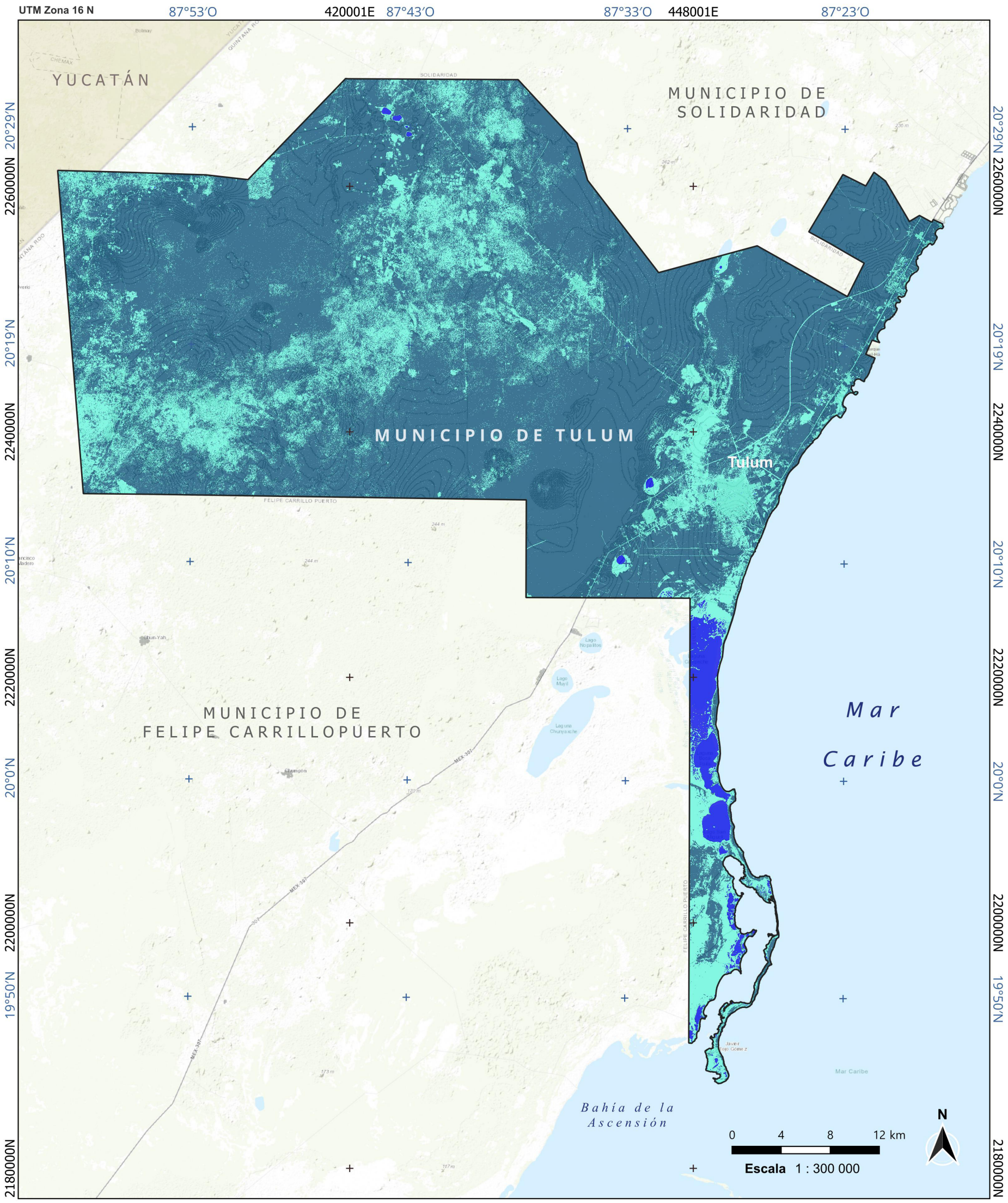
El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) se utiliza para resaltar el aspecto de las masas de agua en una imagen de satélite. Para ello, se reduce considerablemente la reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que dichas masas de agua "destaquen" en la imagen.

Su uso principal es detectar y controlar los cambios leves en la cantidad de agua de las masas de agua. El NDWI permite conocer el contenido de humedad de la vegetación y la humedad del suelo; si relacionamos estos datos con el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), podremos conocer mejor el estado de la vegetación en nuestra ciudad o municipio.

Conocer la humedad del suelo y la humedad de las plantas es esencial para identificar áreas propensas a incendios y prevenirlos. Las longitudes de onda del verde visible maximizan la reflectancia habitual de la superficie del agua. Las longitudes de onda del infrarrojo cercano maximizan la alta reflectancia de la vegetación terrestre y las zonas de suelo, mientras que minimizan la baja reflectancia de las masas de agua.

El resultado de la fórmula NDWI son valores positivos para los elementos de agua y negativos (o cero) para el suelo y la vegetación terrestre. En el caso del municipio de Tulum de acuerdo con los resultados que se pueden observar en la figura 1xx valores menores a cero, siendo los de azul brillante, se identifican los cuerpos de agua más grandes detectados, las lagunas situadas cerca de la comunidad de Cobá y las de la Reserva de Sian Ka'an (figura 1xx). Entre el 0 y el 0.3 son superficies con cierto grado de humedad o construidas, y valores mayores a 0.3 vegetación.

Figura 243. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)



Mapa de Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

NDWI
- <= 0.0
- 0.0 - 0.3
- > 0.3

Límite municipal
Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 2A (2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

Suelo

El suelo es un entorno complejo. De hecho, de los tres vectores ambientales, el suelo es el más complejo y el más incomprendido. Tiene su propia atmósfera interior, régimen del agua, ciertas especies animales y vegetales determinados. Y es un medio dinámico nace, madura, envejece y muere (Encinas, 2011).

La contaminación del suelo se define como un desequilibrio físico, químico o biológico resultante de la acumulación de sustancias en niveles que son tóxicos para los organismos del suelo, lo que resulta en la pérdida de la productividad del suelo.

Al contrario de lo que sucede en el aire y en el agua, como nos señala Encinas (2011), en el suelo los contaminantes son poco móviles. El proceso de dilución es prácticamente inexistente. Solo un pequeño porcentaje de la contaminación del suelo se elimina mediante riego, escorrentía, lixiviados. Sabiendo que el suelo tarda al menos 10,000 años en desarrollarse por completo, podemos decir que cuando el suelo está contaminado, nunca se regenera.

La fuente de contaminación del suelo puede ser natural o artificial (antropogénica). La fuente natural sería la liberación excesiva de una sustancia durante la meteorización de la roca madre, siempre que la sustancia se acumule y sea tóxica para el suelo. Sería un ingrediente natural tóxico. Entre las fuentes artificiales o antropogénicas están: los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los Residuos Industriales (RSI), los abonos, pesticidas, plaguicidas, el agua de riego, la deposición de contaminantes atmosféricos y lixiviados (filtrado), lodos de las depuradoras, y el uso del suelo como depurador de aguas residuales (filtro verde).

Si bien existen muchas técnicas para identificar la contaminación del suelo, sin embargo, para la Gestión del Riesgo de Desastre, el índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y el SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) serían los más afines a la detección de las condiciones del suelo y vegetación del municipio de Tulum.

El NDVI (Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación) ha sido uno de los índices de vegetación más utilizados en la observación remota desde su aparición en la década de los 70.

Para la Gestión de Riesgo de Desastres (GRD) este índice puede:

- Monitorizar sequías y ayudar a pronosticar las zonas con peligro de incendio
- Cuantificar de forma rápida y precisa los daños causados por condiciones climáticas extremas, logrando gastar menos tiempo y recursos humanos;
- Obtener información del campo agrícola con imágenes históricas de hace 30 o 40 años;
- Seguimiento de sectores a cualquier escala (desde una región/ estado a todo un país), con actualizaciones en tiempo real y con éstos prever el pago indemnizaciones, seguros y bonos de desastres; y por lo contrario también puede,
- Identificar los campos que no son elegibles para el pago (por ejemplo, debido a una quema no autorizada).

El índice NDVI es una combinación de bandas espectrales capturadas por satélites de teledetección, el cual ayuda a distinguir la vegetación de otros tipos de cobertura terrestre (artificial) y determinar su estado general. También ayuda a identificar y visualizar áreas de vegetación en el mapa, así como a detectar cambios inusuales en el crecimiento.

En pocas palabras, NDVI mide la condición y la salud de una planta o su vitalidad. Este índice de vegetación es un indicador de verdor y tiene una estrecha relación con la biomasa verde, que representa el crecimiento.

Para el municipio de Tulum se utilizó imágenes Sentinel 2A con fecha de julio de 2023. La intención fue detectar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación del área de estudio. La calidad y desarrollo de la vegetación se encuentran vinculadas con la calidad y composición del suelo.

El método consiste en determinar la densidad del color verde sobre el área de la superficie terrestre de estudio, la cual se estima por los valores de longitudes de onda de la luz solar visible que absorbe la clorofila para su uso en el proceso de fotosíntesis (desde 0.4 micras hasta 0.7 micras) y la luz del infrarrojo cercano reflejado en las hojas (0.7 a 1.1 micras).

El NDVI sus valores van de -1 a 1. Un descenso repentino en los valores de NDVI puede ser una señal de que la salud de las plantas se está deteriorando, debe contrastarse con otros datos disponibles. La interpretación correcta de los valores del NDVI puede ayudar a los agricultores o tomadores de decisión a obtener mejores rendimientos, a la gestión de fertilizantes y cuidar mejor del medio ambiente.

Como ya se mencionó este índice está determinado por valores entre -1.0 y 1.0, donde los valores negativos consisten principalmente en nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a 0 consisten principalmente en roca y tierra desnuda.

Para el caso de Tulum estos se muestran en rojo (figura 244) que corresponden a los cuerpos de agua, a las lagunas principalmente.

Valores muy pequeños (0.1 o menos) de la función NDVI corresponden a zonas sin roca, arena o nieve. En Tulum estos valores hasta 0.2 corresponden a zonas urbanas y construidas.

Los valores medios (0.2 a 0.3) representan arbustos y pastizales, estos corresponden en el mapa hasta 0.4 mientras que los valores altos (0.6 a 0.8) representan bosques templados y tropicales. En Tulum son los mayores a 0.4 que corresponden a selva (figura 244).

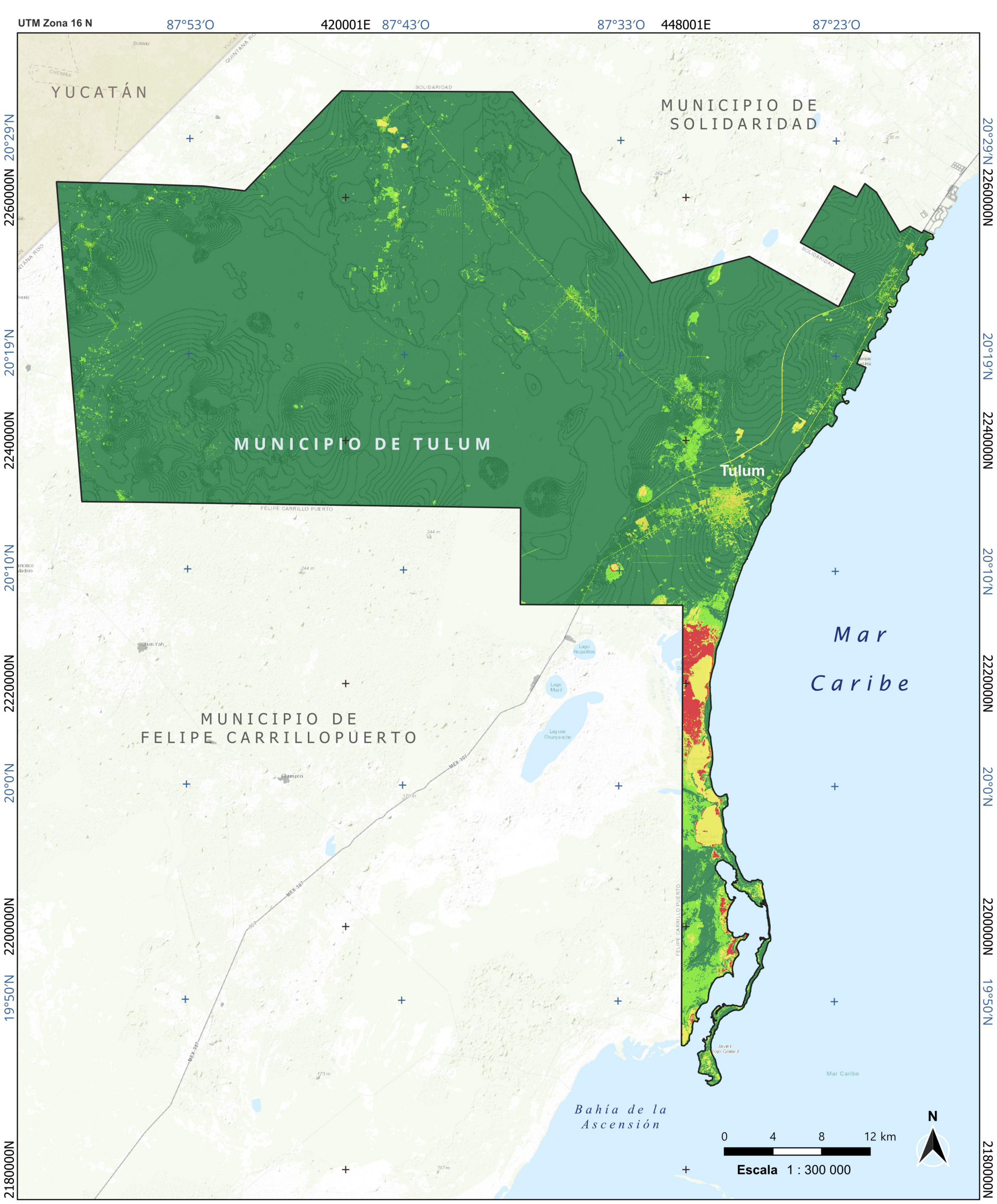
SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo)

El índice de vegetación SAVI es una alternativa al índice NDVI clásico que corrige la influencia inducida por el suelo durante los estudios botánicos en las bandas del espectro electromagnético. El índice SAVI se puede utilizar para contrastar el NDVI bajo ciertas condiciones de presencia de vegetación o el estado de la materia y la vegetación.

El índice SAVI es más adecuado para estudios que analizan la vegetación en una etapa temprana de desarrollo o con vegetación escasa. En general, SAVI puede ser una buena alternativa entre cualquier suelo con baja densidad vegetativa y donde exista contacto con la superficie del suelo. Si durante su análisis la exposición del suelo es mayoritariamente dominante sobre la vegetación, puede utilizar SAVI para reemplazar el NDVI. Los valores que puede obtener este índice también van de -1 a 1.

Para el municipio de Tulum se observa en la figura 3xx valores de 0 a 0.5. Los valores menores a 0 indican los cuerpos de agua. Los valores 0 a 0.1 es suelo desnudo o suelo árido, de 0.1 a 0.5 baja cobertura vegetal, vegetación en crecimiento, matorrales y mayores a 0.5 vegetación densa.

Figura 244. Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI)



Mapa de Índice Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI)

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

NDVI
- < 0
- 0.0 - 0.2
- 0.2 - 0.4
- > 0.4

- Límite municipal
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 2A (2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

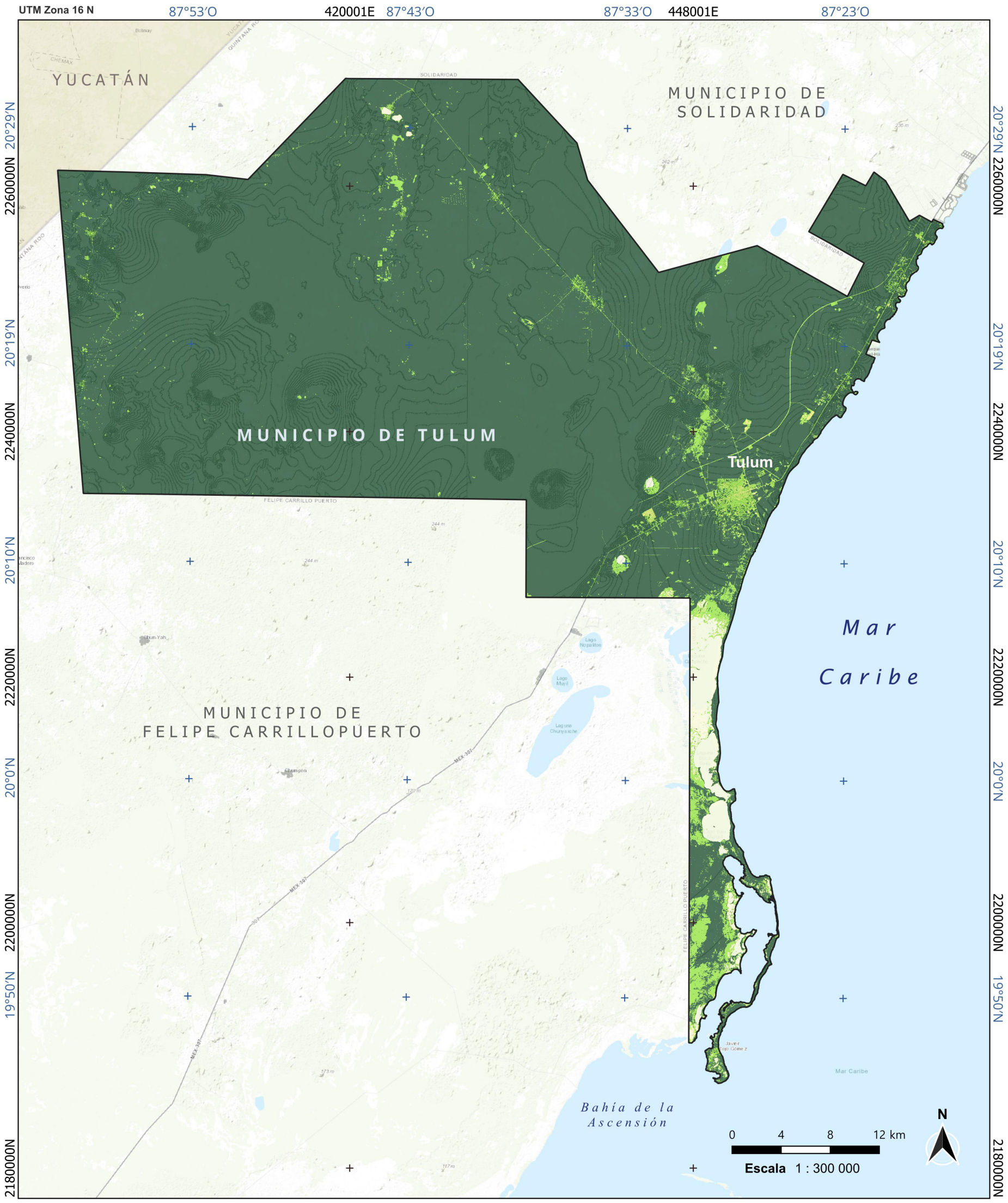
Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

Figura 245. Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)



Mapa de Índice Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI)

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2023

Simbología

SAVI
- <= 0.0
- 0.0 - 0.1
- 0.1 - 0.5
- > 0.5

- Límite municipal
- Estado de Yucatán

Fuente:

Marco Geoestadístico Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Imagenes ESA Sentinel 2A (2023).
Modelo Digital de Elevación obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0, INEGI). Conjunto Nacional (INEGI, 2018).

Información técnica:

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: febrero 2023

Fuente: Elaboración propia.

5.5.2. Epidemias y plagas

Una epidemia o plaga constituye un desastre sanitario en el sentido estricto del término. Esta clasificación también es complementaria a la contaminación del aire, el agua, el suelo y los alimentos debido a pandemias, bioterrorismo, desertificación y lluvia ácida como riesgos ecológicos-sanitarios.

Una epidemia es un aumento inesperado, a menudo repentino, de una enfermedad particular en una comunidad o región. Una pandemia ocurre cuando una epidemia ocurre en todo el mundo, cruzas fronteras internacionales y afecta a muchas personas. Un ejemplo es la propagación del COVID-19, conocido como coronavirus. Algunas enfermedades infecciosas pueden suponer una importante amenaza para la salud a nivel local, regional y mundial y dar lugar a epidemias o pandemias. Las enfermedades y las pandemias se pueden prevenir y minimizar mediante una serie de medidas en el hogar y la comunidad, como una buena higiene, el distanciamiento social y las vacunas.

Para hacer frente a este tipo de riesgo para la salud, es fundamental que los gobiernos tienen políticas, estrategias y acciones para atender la emergencia de salud pública y prevenir la propagación de enfermedades, especialmente aquellas de interés internacional (CEFP, 2020).

La pandemia del virus H1N1 del año 2009 puso a prueba los protocolos de atención a la preparación y respuesta a emergencias provocadas por gripe (Aviar y humana – H5N1), cuyo aprendizaje se resumen en que «el mundo está mal preparado para responder a una pandemia grave de gripe o a cualquier emergencia de salud pública que represente una amenaza semejante de alcance global y sostenida” (OMS, 2017).

A principios de diciembre de 2019 se detectó una neumonía de origen desconocido en la ciudad de Wuhan, China. Como resultado, las autoridades sanitarias chinas se vieron sorprendidas por una serie de neumonías de origen desconocido y capaces de propagarse con mucha facilidad. El 01 de enero de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) solicitó nueva información a las autoridades sanitarias de China para evaluar adecuadamente el riesgo real de la epidemia. Al principio, se creía que la epidemia podría controlarse localmente en China. El 11 de marzo de 2020, a la luz de la propagación internacional rápida y gradual de la epidemia, la OMS declaró el estado de pandemia, recordando a los países el camino a seguir (Serrano-Cumplido et al., 2020).

El primer caso de COVID-19 se detectó en México el 27 de febrero de 2020. En Quintana Roo el primer caso positivo fue el 13 de marzo de 2020 al 28 de marzo se tenían 37 casos positivos. De los cuales dos corresponderían al municipio de Tulum.

COVID-19

Al principio, se creía que la epidemia podría controlarse localmente en China. El 11 de marzo de 2020, a la luz de la propagación internacional rápida y gradual de la epidemia, la OMS declaró el estado de pandemia, recordando a los países el camino a seguir.

Ante la declaratoria de la Organización Mundial de la Salud de considerar a la COVID-19 como una emergencia de salud pública, el día 30 de enero de 2020 se llevó a cabo una reunión extraordinaria del Comité Nacional para la Seguridad en Salud, en la que destacan acciones de preparación y respuesta para la protección de la salud en México (DOF, 2020).

COVID-19 es el acrónimo del término en inglés “coronavirus disease 2019”, que significa “enfermedad del coronavirus 2019”. Es una infección del tracto respiratorio causada por un nuevo tipo de coronavirus que comenzó en el año 2019. Una infección del tracto respiratorio es una enfermedad que afecta la nariz, la garganta, las vías respiratorias o los pulmones. La COVID-19 es muy contagiosa y se propaga fácilmente de una persona a otra.

En el estado de Quintana Roo, México, el 13 de marzo se confirmó el primer caso de SARS-CoV-2 y el 24 de marzo de 2020 se registró la primera muerte. Las autoridades locales tomaron medidas de acuerdo con la política pública de atención, tanto a nivel mundial como nacional y se ha establecido un sistema de prevención y vigilancia de enfermedades con información para el perfil epidemiológico de Quintana Roo (Gómez-Rivera, et al., 2020).

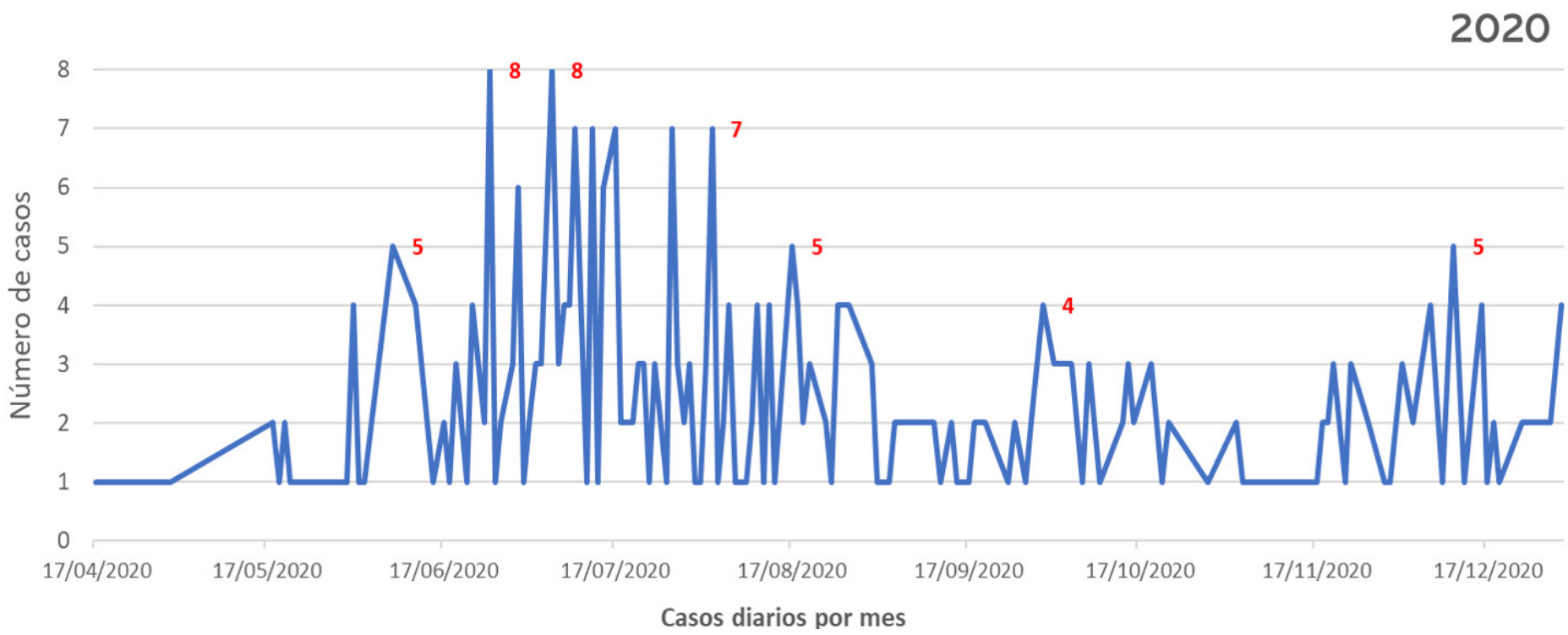
En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento de casos confirmado de COVID-19 en el municipio de Tulum durante 2020, 2021, 2022 y 2023, por casos totales diarios y casos totales por mes (figuras 246 al 251).

En 2020 el municipio de Tulum tuvo en total 325 casos, siendo julio el mes con más casos positivos con 90 (figura 247). Los casos diarios fueron 8 el máximo por día presentándose en el mes de junio y julio (gráfico 1).

Para 2021 el comportamiento de la enfermedad de COVID-19 tuvo variaciones diferentes, el total de casos para ese año fue de 245 confirmados. Se observa en el gráfico 3 que los casos diarios máximos fueron 6 y los meses con más positivos fueron enero con 44 y agosto con 41 (figura 249).

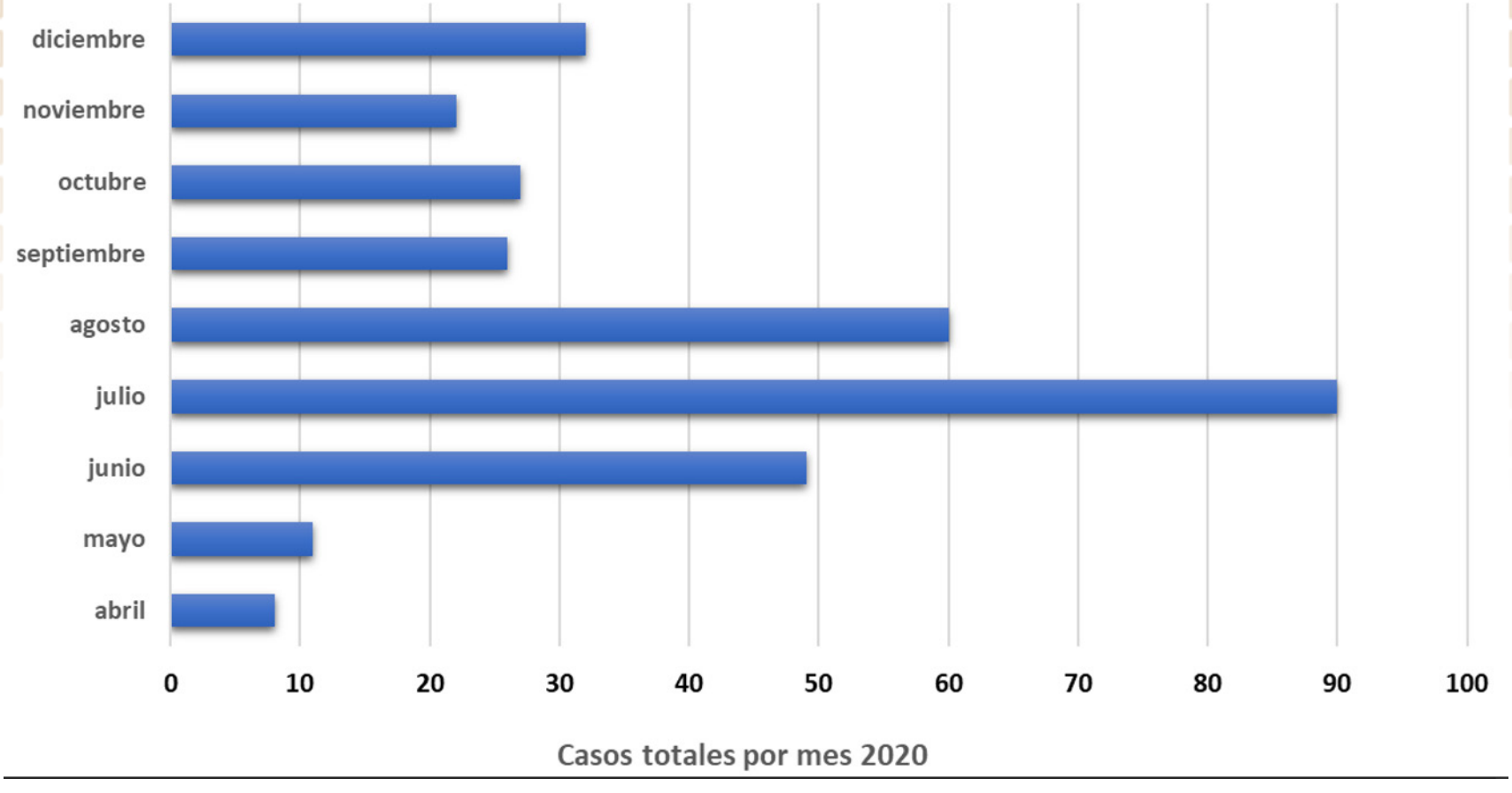
En 2022, se observa el descenso debido ya a los esquemas de vacunación aplicados, dando un total de solo 74 casos para el municipio para ese año. En el gráfico 5 los casos diarios máximos fueron 5 solamente en el mes de febrero y 3 en el mes de julio. El mes que más casos acumulo fue enero con 51, le sigue julio con 10, junio con 8, febrero con 2, marzo, septiembre y diciembre solo con un caso, el resto de los meses no tuvo ningún caso (figura 251). Para 2023, a la fecha solo se a detectado un caso el 21/02/2023.

Figura 246. Gráfico de casos diarios por COVID-19 del municipio de Tulum 2020.



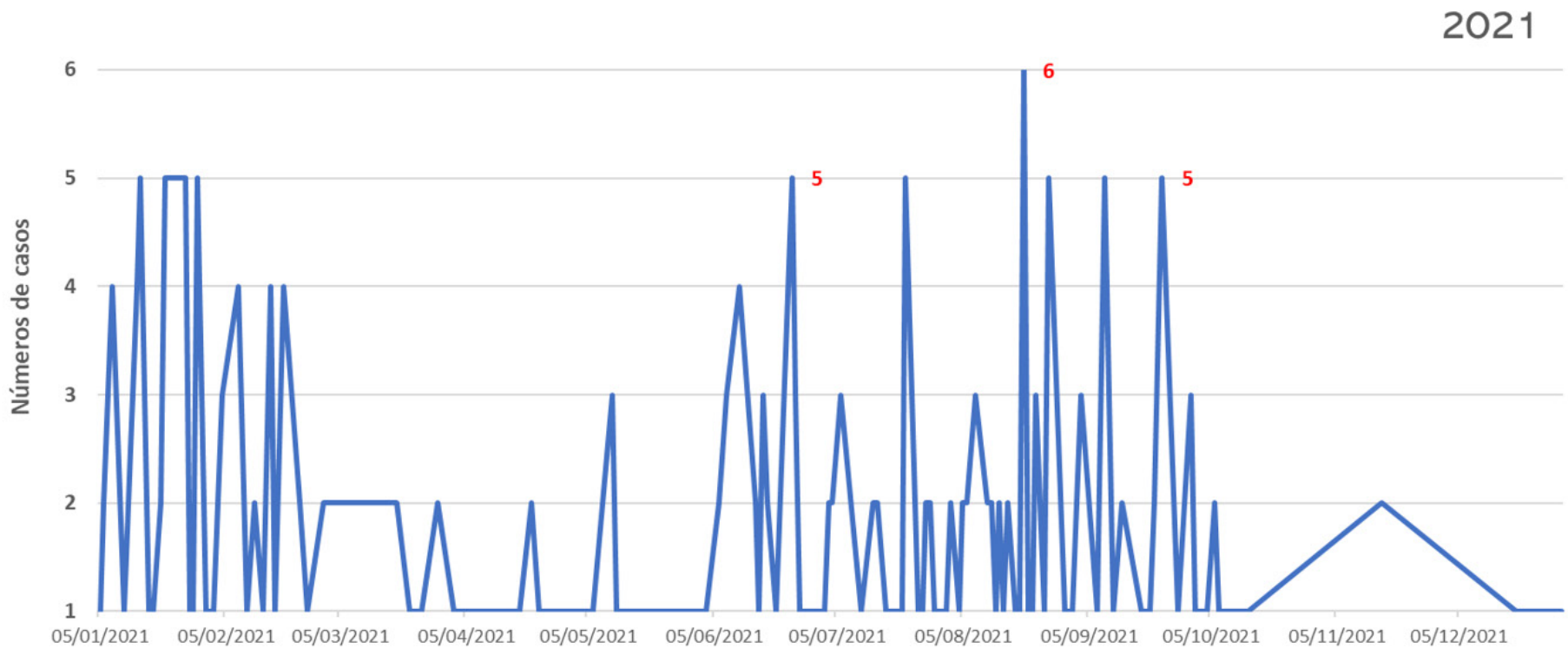
Fuente: CONAHCYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab (https://datos.covid-19.conacyt.mx/#DOView)

Figura 247. Gráfico de casos mensuales COVID-19 del municipio de Tulum 2020.



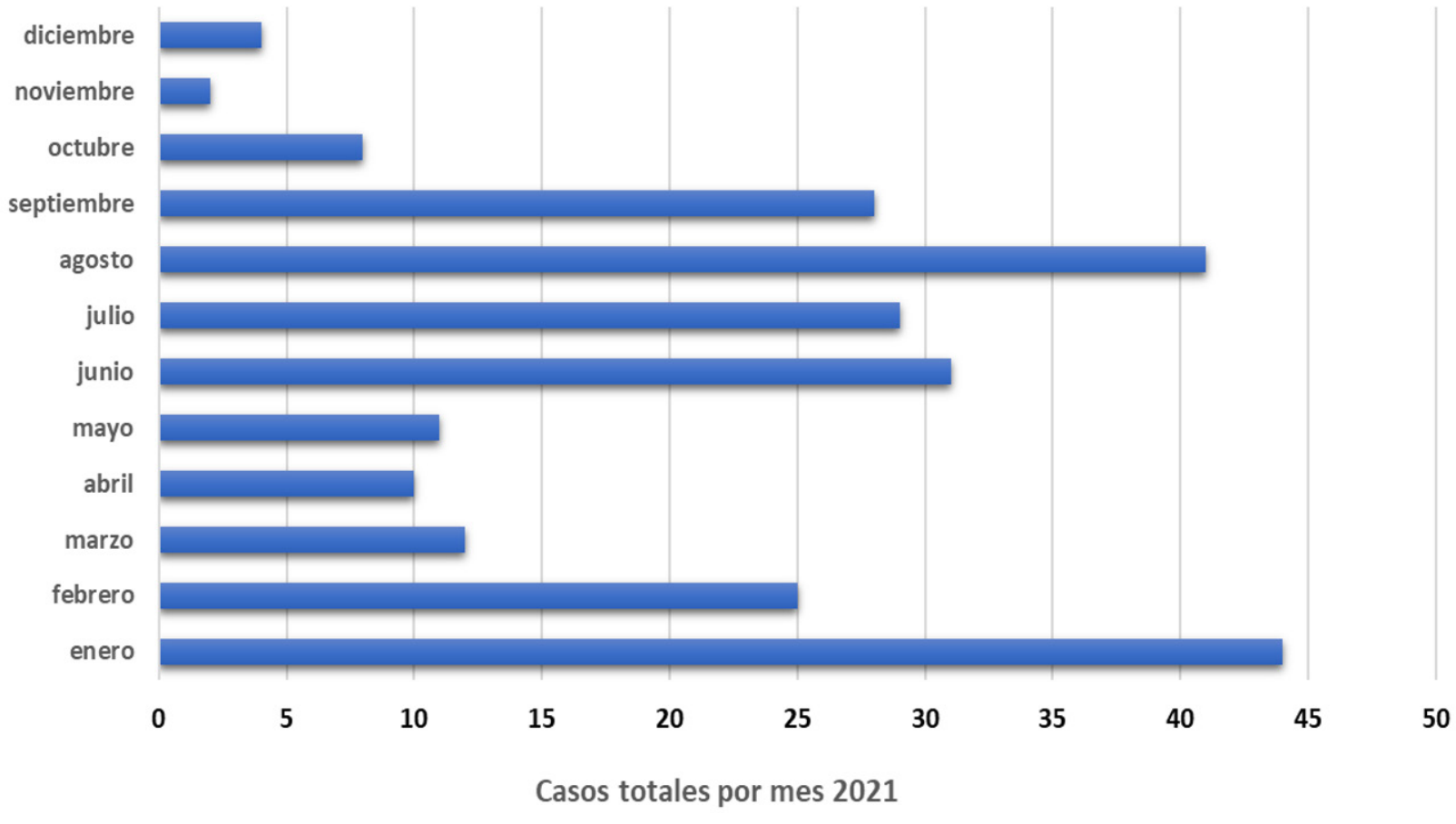
Fuente: CONAHCYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab (https://datos.covid-19.conacyt.mx/#DOView)

Figura 248. Gráfico de casos diarios por COVID-19 del municipio de Tulum 2021.



Fuente: CONAHCYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab (https://datos.covid-19.conacyt.mx/#DOView)

Figura 249. Gráfico de casos mensuales COVID-19 del municipio de Tulum 2021.



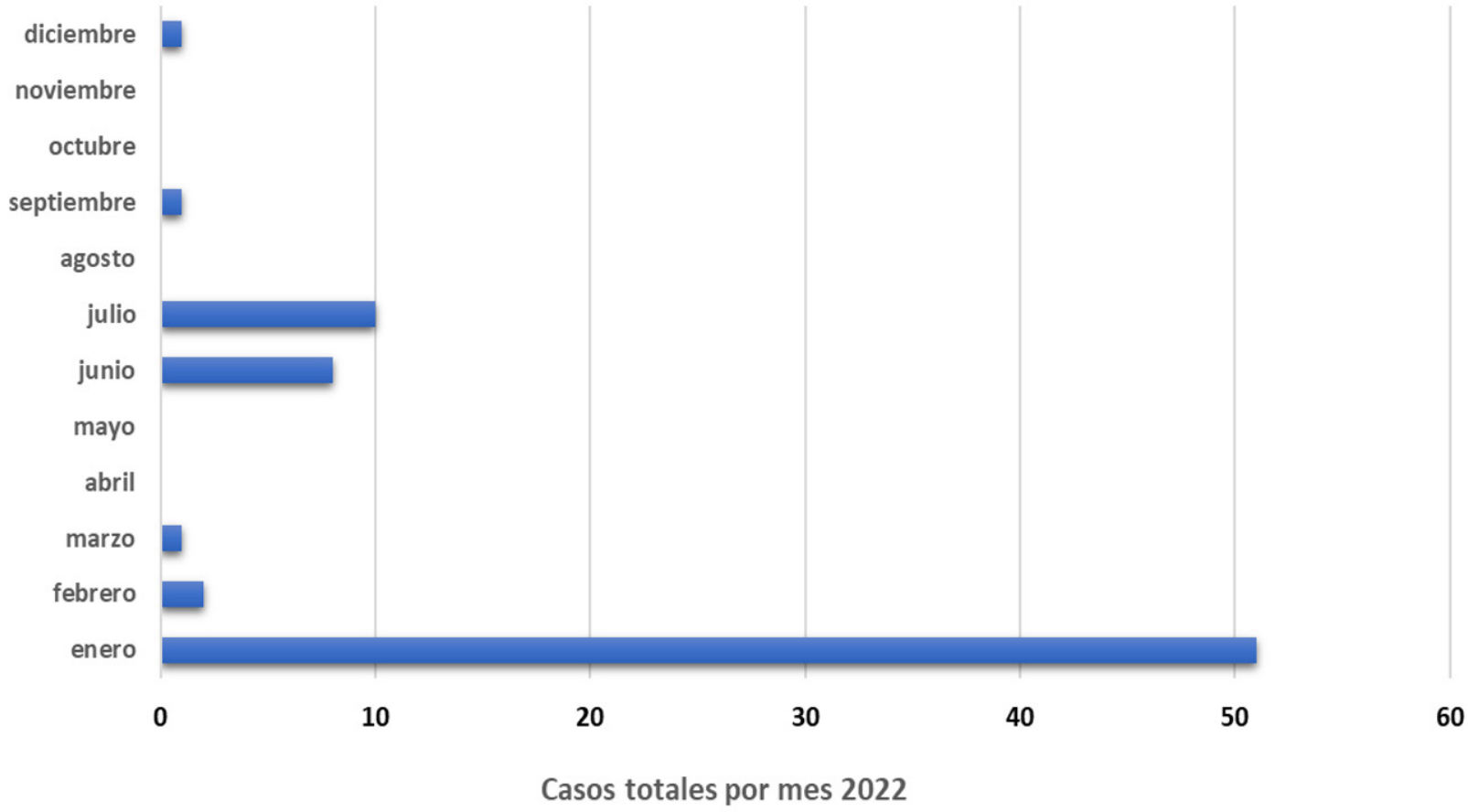
Fuente: CONAHCYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab (https://datos.covid-19.conacyt.mx/#DOView)

Figura 250. Gráfico de casos diarios por COVID-19 del municipio de Tulum 2022.



Fuente: CONAHCYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab (https://datos.covid-19.conacyt.mx/#DOView)

Figura 251. Gráfico de casos mensuales COVID-19 del municipio de Tulum 2022.



Fuente: CONAHCYT - CentroGeo - GeoInt - DataLab (https://datos.covid-19.conacyt.mx/#DOView)

Dengue

El dengue es una enfermedad causada por un arbovirus de la familia Flaviviridae, que tiene cuatro serotipos distintos, pero estrechamente emparentados: DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4. El virus del dengue se transmite por mosquitos hembra, principalmente de la especie Aedes aegypti y, en menor grado, Ae. Albopictus (SESA, 2021).

El dengue es actualmente una de las principales enfermedades infecciosas transmitidas por vectores (ETV) de origen viral y está clasificada como un problema de salud pública a nivel mundial.

En México, de 2000 a 2009, como señala SESA (2021) se observó una tendencia ascendente, luego disminuyó en 2011, luego aumentó nuevamente en 2013 y continuó disminuyendo hasta 2016. En el 2018 el acumulado de casos fue de 12, 706 casos, en el 2019 fue de 28,820 casos de dengue no grave (DNG), 10.982 casos de dengue con signos de alarma (DCSA) y 3.560 casos de dengue grave (DG) con incidencia de 22,89, respectivamente; 8,72 y 2,83 casos por 100.000 habitantes. Por su parte, en Quintana Roo, durante el 2019 se notificaron 1,950 casos confirmados de dengue, correspondientes a 913 casos de DG, 944 casos de DCSA y 93 casos de DG, reflejando una incidencia global de 111,17 por 100,000 habitantes y una tasa de mortalidad de 1.25 por cada 100 casos de DCSA+DG.

Causas

Su presencia obedece a la conjunción de diversos factores:

1). circulación viral cíclica de los cuatro serotipos,

2). co-circulación de más de un serotipo en una misma región,

3). altas densidades vectoriales,

4). cambios en fenómenos climáticos asociados a la alteración de su intensidad y duración, como ejemplo:

   a. frecuencia de lluvias

   b. huracanes más intensos

3). deficientes servicios públicos:

   a. escasez en la dotación de agua,

   b. mala disposición de la basura

5.5.2.1. Resultado análisis

De acuerdo con el análisis presentado por la Secretaría de Salud del Estado de Quintana Roo (SESA, 2021), la transmisión del Dengue se caracterizó por la diversidad de factores que indujeron un ambiente favorable para 2020.

Se dio de manera natural en los municipios de Othón P. Blanco, Bacalar, Benito Juárez, Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas, Solidaridad, Tulum, Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos; con un total de 228 casos confirmados a dengue, una tasa de incidencia a nivel estado de 13.23 casos por cada 100,000 habitantes, y una tasa de mortalidad de 0.06 por cada 100,000 habitantes y una letalidad de 0.91 por cada 100 caso de dengue con signos de alarma y dengue grave, en comparación con el número total de casos estimados correspondiente a 523 casos, el cual refleja una tasa de incidencia de 30.37 casos por cada 100,000 habitantes.

Para el caso particular del municipio de Tulum solamente fueron 3 casos confirmados, con una tasa de incidencia de 7.84 casos por cada 100 mil habitantes y una tasa de mortalidad y letalidad de cero, 12 casos estimados y una tasa de ocurrencia de 31.35% por cada 100 mil habitantes (tabla 115).

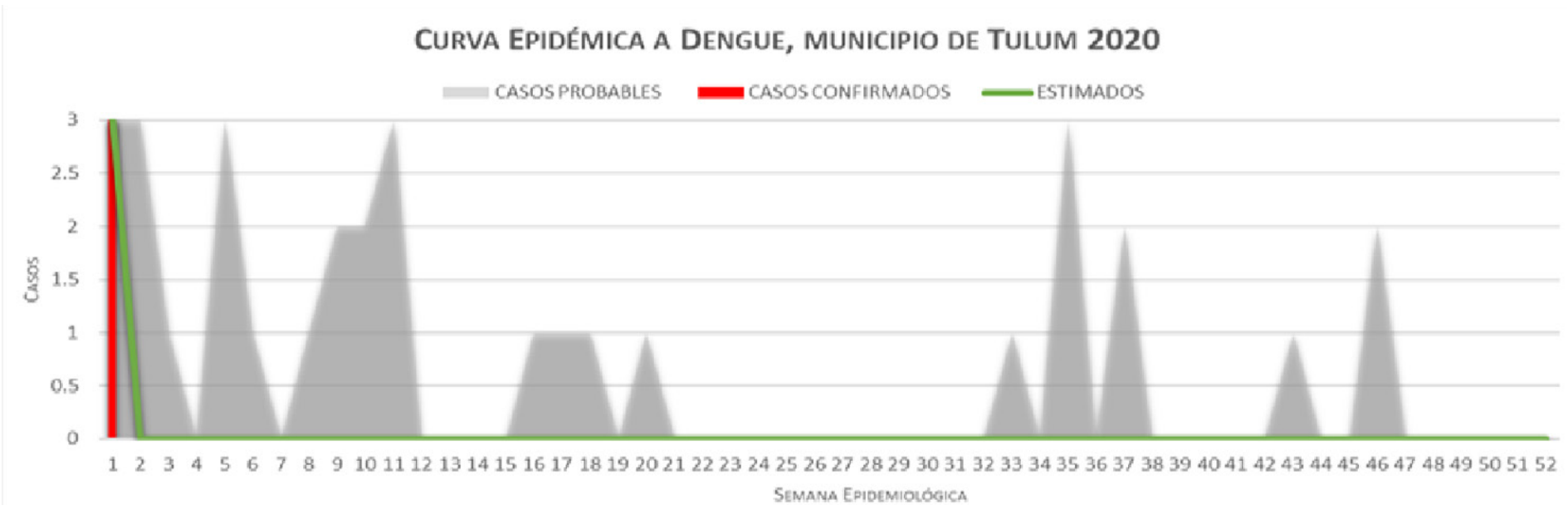
Tabla 115. Morbilidad y Mortalidad de Dengue por municipio, Quintana Roo 2020

VIGILANCIA EPIDEMIOLOGICA DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD DE DENGUE, QUINTANA ROO 2020											
MPIO.	DNG	DCSA Y DG	Total	Tasa Incid.*	Muestras Acum.	% Positividad	Def.	TM.**	Letalidad.***	Casos Estimados	CE Tasa Incid.*
OTHON P. BLANCO	34	14	48	18.48	1162	4.13	1	0.38	7.14	91.25	35.12
BACALAR	10	4	14	29.18	83	16.87	0	0.00	0.00	22.92	47.77
BENITO JUÁREZ	43	67	110	12.87	313	35.14	0	0.00	0.00	317.31	37.13
COZUMEL	0	0	0	0.00	13	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
ISLA MUJERES	1	2	3	14.05	7	42.86	0	0.00	0.00	3.50	16.39
LÁZARO CÁRDENAS	4	0	4	12.61	50	8.00	0	0.00	0.00	9.41	29.65
SOLIDARIDAD	3	7	10	4.33	48	20.83	0	0.00	0.00	30.47	13.19
TULUM	0	3	3	7.84	9	33.33	0	0.00	0.00	12.00	31.35
FELIPE CARRILLO PUERTO	16	9	25	26.31	223	11.21	0	0.00	0.00	23.92	25.17
JOSÉ MARÍA MORELOS	7	4	11	24.49	144	7.64	0	0.00	0.00	12.50	27.83
TOTAL	**118**	**110**	**228**	**13.23**	**2052**	**11.11**	**1**	**0.06**	**0.91**	**523.28**	**30.37**

FUENTE: LESP/SINAVE * Tasa por 100,000 Hab. **Tasa mortalidad por 100,000 ***Letalidad por 100 casos

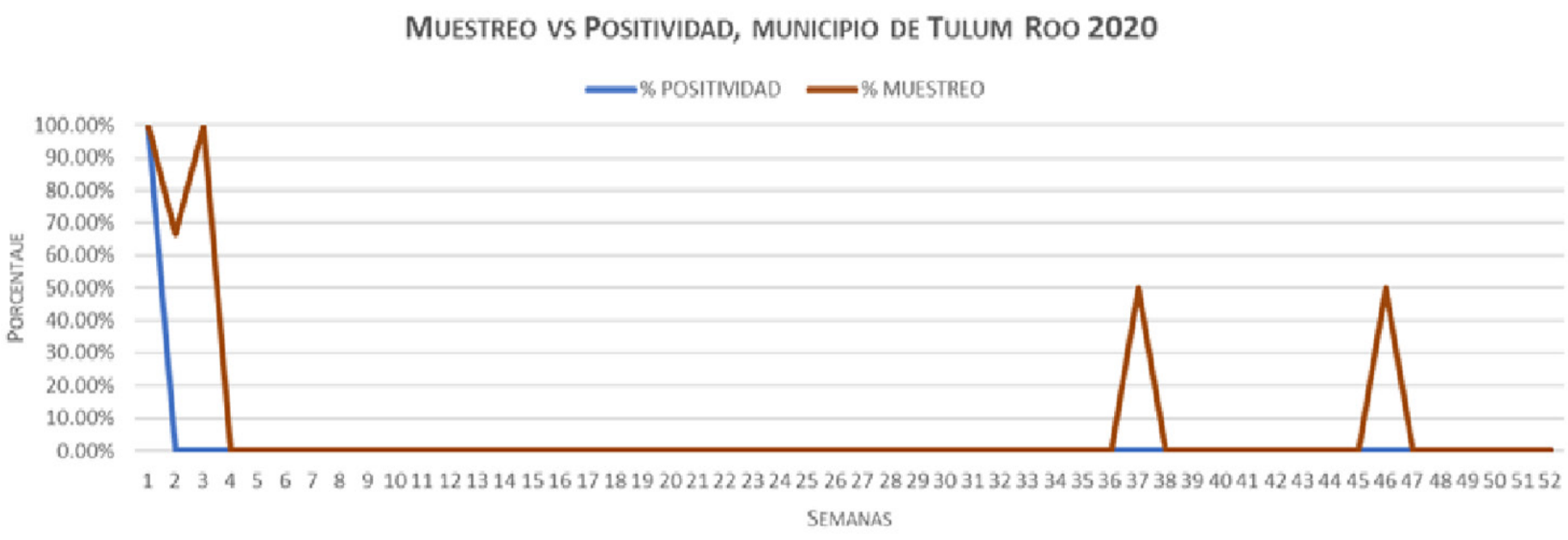
Las figuras 252 y 253 muestran los casos confirmados para el municipio de Tulum en la semana 1 y 2 de 2020. Los casos confirmados se muestran en casi 3. Por otro lado, el muestreo de casos también se centra en las primeras semanas, la baja se incidencia puede vincularse a que en 2020 todavía existían restricciones de salida por COVID-19.

Figura 252. Gráfica de caracterización de casos Probables, Confirmados y Casos Estimados, Tulum, Quintana Roo 2020.



Fuente: SESA (2021).

Figura 253. Gráfica de Muestreo y positividad (%), Tulum, Quintana Roo 2020.



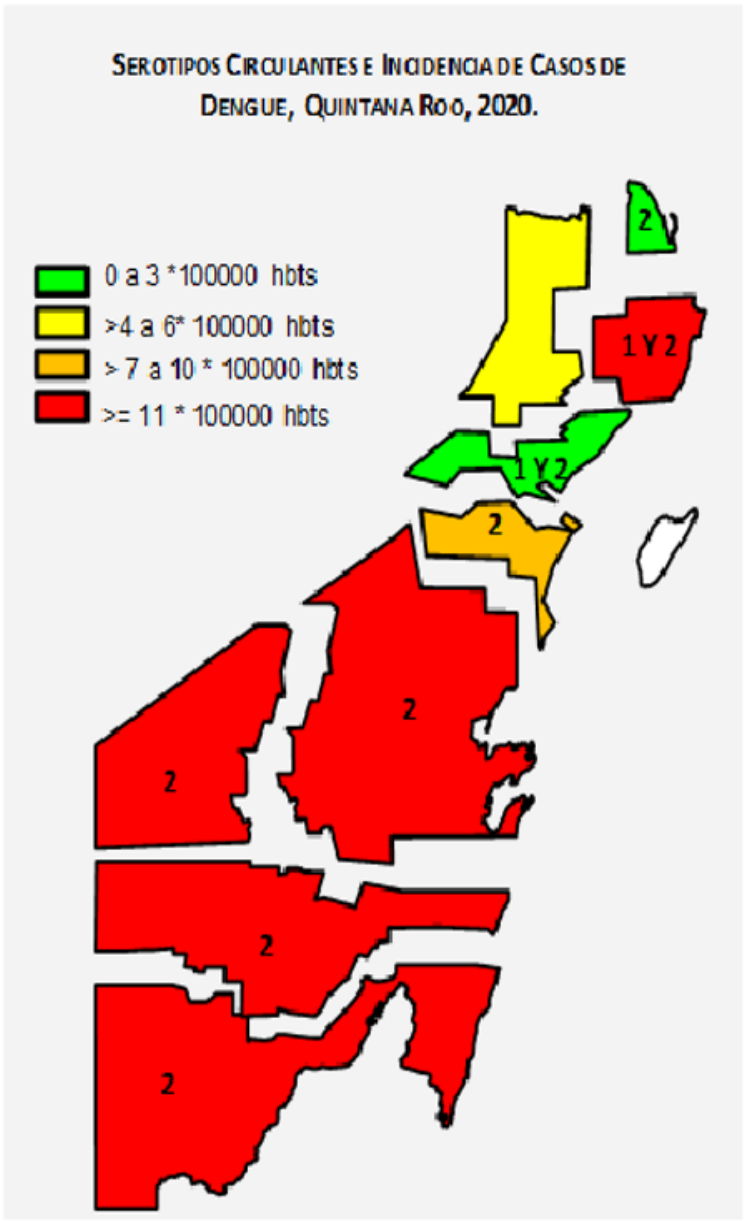
Se sugiere fortalecer la vigilancia epidemiológica de dengue en los diferentes niveles técnicos administrativos, haciendo evidente la utilidad y necesidad de los datos que generan mediante la detección, notificación y seguimiento de casos.

5.5.2.2. Mapas resultantes de susceptibilidad y peligros ponderados

Los casos de Dengue se identificaron por sus serotipos circulantes por municipio y porcentaje (figura x2). Para el municipio de Tulum el serotipo reconocido fue DENV-2 con un total de 2 casos.

Estos primeros cuatro serotipos (DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4) muestran diferencias en la composición de su genoma y antígenos de superficie. Una persona infectada con uno de estos virus será inmune de por vida, pero no estará protegida contra los otros tres serotipos. Investigaciones recientes han demostrado que cada serotipo se puede subdividir en genotipos según el lugar del mundo donde se encuentra el virus, y cada genotipo se puede subdividir en genotipos internos según las diferencias en la composición del genoma.

Figura 254. Serotipos circulantes e incidencia de casos de Dengue, 2020



Fuente: SINAVE _ Enfermedad Trasmitida por Vector S.E. 53 – 2020

Serotipos Circulantes Identificados Por Municipio y Porcentaje. Quintana Roo 2020

MUNICIPIO	INDETERM.	DENV-1	DENV-2	DENV-3	DENV-4	TOTAL
BAC	2	-	2	-	-	4
OPB	3	-	4	-	-	7
BJ	5	15	66	-	-	86
COZ	-	-	-	-	-	0
IM	-	2	-	-	-	2
LC	-	-	1	-	-	1
SOL	-	1	5	-	-	6
TUL	-	-	2	-	-	2
FCP	2	-	2	-	-	4
JMM	-	-	2	-	-	2
Total	12	18	84	0	0	114
%	10.5%	15.8%	73.7%	0.00%	0%	

Fuente: SINAVE _ Enfermedad Trasmitida por Vector S.E. 53 – 2020

Fase III
Vulnerabilidad

6. FASE III. VULNERABILIDAD

6.1. Vulnerabilidad social

6.1.1. Grado de vulnerabilidad social

El riesgo, que es la probabilidad de que ocurran efectos adversos, depende de dos factores: el peligro y la vulnerabilidad. Esta última puede estimarse para un territorio y su población, lo cual es indudablemente necesario elaborar procedimientos y medidas eficaces de mitigación y reducir los efectos negativos. (Guevara Ortíz, 2006)

El concepto de vulnerabilidad está definido en el artículo 1° de la Ley General de Protección Civil (Ley General de Protección Civil, 2020) como la "susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales_". Por su parte (Guevara Ortíz, 2006) la define como "la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas"_.

Esta vulnerabilidad puede clasificarse en dos tipos, la social y la física. La primera puede evaluarse cualitativamente relacionando los aspectos socioeconómicos, educativos, culturales, nivel de preparación ante sistemas perturbadores, entre otros. La vulnerabilidad física puede cuantificarse utilizando variables físicas, tales como la resistencia de los materiales de construcción ante la fuerza de los vientos huracanados o las inundaciones (Guevara Ortíz, 2006).

Respecto a la vulnerabilidad social se puede decir que existen diversos factores que pueden determinar la situación y el bienestar de las personas. De acuerdo (Guía básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos, 2006), una mayor vulnerabilidad social es consecuencia de la pobreza, el crecimiento demográfico y la urbanización acelerada; y esta va a determinar el grado de efectividad en el que un grupo social podrá hacerle frente a una emergencia, la rapidez de su rehabilitación y la de su recuperación. Aquellos que se encuentran en situaciones de mayor vulnerabilidad tienen mayores dificultades para acceder a recursos y oportunidades básicas, lo que puede limitar su calidad de vida, su seguridad y su participación plena en la sociedad.

Es importante destacar que la vulnerabilidad social no se limita únicamente a la falta de recursos económicos. Si bien la pobreza es uno de los principales determinantes de la vulnerabilidad, existen otras dimensiones que también influyen en la capacidad de las personas para satisfacer sus necesidades básicas y desarrollarse plenamente. Estas dimensiones pueden incluir aspectos como la salud, la seguridad, el acceso a la educación, la igualdad de género, la edad, la discapacidad, entre otros.

El grado de vulnerabilidad social puede variar tanto a nivel individual como colectivo, y su magnitud puede estar influenciada por factores contextuales y estructurales. Por ejemplo, una comunidad o región con altos índices de pobreza, falta de infraestructuras y servicios básicos, y con altos niveles de violencia, puede enfrentar una mayor vulnerabilidad social en comparación con otras áreas más desarrolladas.

Para medir la vulnerabilidad social en el municipio de Tulum se empleó la metodología de CENAPRED (2006) de la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social. Capítulo II. Vulnerabilidad social; basada en indicadores que proporcionarán valiosos elementos de análisis.

Uno de los primeros pasos que se realizó fue la caracterización de los elementos del medio natural, sociales, demográficos y económicos del municipio, asimismo para medir la vulnerabilidad social del municipio se consideraron los indicadores socioeconómicos.

Los indicadores socioeconómicos se dividen en cinco categorías: salud, educación, vivienda, empleo e ingresos y población; de igual forma, estas se subdividen en 18 indicadores, los cuales se obtienen a partir de datos estadísticos; tres referentes a salud, tres relativos a educación, seis para vivienda, tres para empleo e ingresos y tres para población.

Los indicadores a nivel municipal y localidad fueron calculados con base a la información del Censo de Población y Vivienda del 2020. Para poder calcular la vulnerabilidad social asociada a desastres, la metodología señala el cálculo de indicadores socioeconómicos ya establecidos en las fichas elaboradas por CENAPRED, estos indicadores tienen valores que van de 0 a 1, donde 1 corresponde al nivel más alto de vulnerabilidad y 0 al nivel más bajo, lo anterior permitirá una aproximación al grado de vulnerabilidad de la población con base en sus condiciones sociales y económicas, que es un parámetro para medir las posibilidades de organización y recuperación después de un desastre. El resultado obtenido será la calificación final de las características socioeconómicas y la obtención del grado de vulnerabilidad social del municipio.

6.1.1.1. Características sociales y económicas

Las características sociales y económicas son aspectos de una población relacionados con su estructura y situación económica. Estos factores incluyen factores como el acceso a la salud, las características de educación, las condiciones de la vivienda, el acceso a recursos y servicios básicos, el nivel de ingresos y empleo y las condiciones de la población.

Las diferencias de estas características influyen en la vulnerabilidad ante amenazas naturales ya que determinan la capacidad de la población para prepararse, resistir, responder y recuperarse de dichas amenazas.

Las personas con bajos ingresos y poco acceso a servicios esenciales suelen ser más vulnerables frente a amenazas naturales. El nivel educativo puede influir en la capacidad de comprender y responder adecuadamente a las alertas de desastres, así como en la capacidad de adoptar prácticas de prevención y mitigación. Las personas con empleos estables y un nivel de ingresos adecuado generalmente tienen más recursos para prepararse y recuperarse de los desastres.

Indicadores de Salud

De acuerdo con los Servicios Estatales de Salud (SESA, 2023) al año 2022, en Quintana Roo se contaba con 372 médicos generales en unidades de primer nivel de atención 1 que otorgaban en promedio 4 consultas por día; sin embargo, esto solo corresponde al personal médico contratado por los servicios de salud estatales. Esta misma dependencia de gobierno reporto en el año 2017 (Alejandro Huitrón Hernández, 2017) que se tenía un total de dos mil 19 médicos (817 médicos generales, 1,136 médicos especialistas y 66 odontólogos).

En cuanto al municipio de Tulum (SESA, 2021) existen 15 médicos generales y 1 odontólogo, 10 consultorios de primer nivel, 3 ambulancias, 1 sala de urgencias, 1 laboratorio, 2 equipos de rayos X.

Durante el año 2020, en Quintana Roo hubo 24,063 nacimientos; en el municipio de Tulum ocurrieron 745 de ellos (3%). Las madres sin labor remunerada representan el 68% del total, las madres con remuneración laboral representan el 18%, el porcentaje restante no especifico. Para el estado de Quintana Roo, en el año 1994 se registraban un total de 25.8 defunciones de menores de un año por cada mil nacimientos, en el año 2019 se habían reducido a 10.4. Se espera disminuir la mortalidad infantil a 7.4 en 2030 y a 3.5 en 2050 (Consejo Nacional de Población, 2019). Por otra parte, se reportan 962 nacimientos y 14 defunciones de menores de un año para el municipio de Tulum (INEGI, 2023).

Respecto a la población afiliada a los servicios de salud, el INEGI (2020) reporta que en el municipio de Tulum existen 28,331 personas afiliadas, lo que representa el 60.6% del total de la población. De estas personas el 90.5% están afiliadas al IMSS (34.5%) y al INSABI (56.0%).

---

1 Los niveles de atención médica en México son 3: El primer nivel es la atención primaria (primer contacto con el paciente), es decir el nivel más cercano al sitio donde habita el paciente y se integra de unidades médicas ambulatorias. El segundo nivel lo integran los hospitales generales que dan atención a la mayoria de los padecimientos que requieren hospitalización o atención de urgencia. El tercer nivel corresponde a los hospitales de alta especialidad.

Tabla 116. Indicadores de salud.

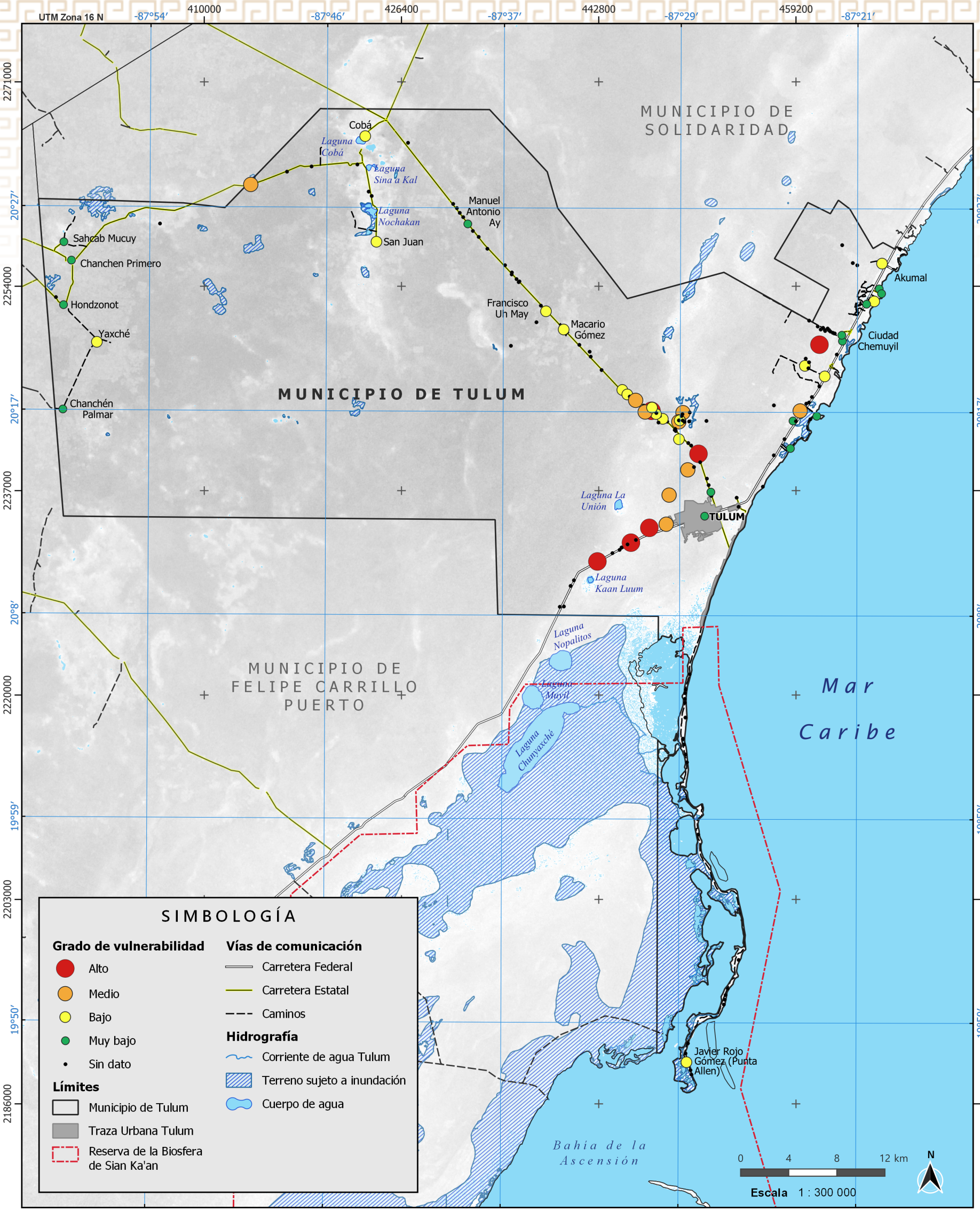
Sector	Variable	Procedimiento	Justificación	Cálculo	Rangos	Grado de vulnerabilidad	Valor asignado	Rango del municipio	Calificación
Salud	Médicos por cada 1,000 habitantes	La proporción de médicos por 1,000 habitantes se obtiene de la multiplicación del número de médicos por mil y se divide entre el total de la población	La Secretaría de Salud indica que es aceptable que exista un médico por cada 1,000 habitantes, por lo que el indicador reporta la disponibilidad de médicos para atender a la población por cada 1,000 habitantes en un periodo determinado. La baja proporción de médicos se reflejará en las condiciones de salud de la población, lo que agudiza las condiciones de vulnerabilidad, situación que se podría acentuar en caso de emergencia o desastre.	PM = (15 médicos x 1000)/ (población municipal: 46,721) = 0.3	De 0.20 a 0.39 Médicos por cada 1,000 habitantes	Muy Alto	1.00	0.3	1.00
					De 0.4 a 0.59 Médicos por cada 1,000 habitantes	Alto	0.75		
					De 0.6 a 0.79 Médicos por cada 1,000 habitantes	Medio	0.50		
					De 0.8 a 0.99 Médicos por cada 1,000 habitantes	Bajo	0.25		
					Uno o más Médicos por cada 1,000 habitantes	Muy Bajo	0.00		
	Tasa de Mortalidad	El resultado se obtiene de dividir el número de defunciones de niños menores de un año de edad en un período determinado, entre los nacidos vivos en el mismo periodo y el resultado se multiplica por mil.	Este indicador se refiere a la posibilidad de un recién nacido de sobrevivir el primer año de vida. Tomando en cuenta que el riesgo de muerte es mayor en los primeros días, semanas y meses de vida, la mortalidad durante este periodo indicará en gran medida las condiciones de la atención a la salud de la población en el caso de la madre.	TMI = (14 defunciones de menores de un año / 962 nacimientos) * 1000 = 14.52	57.0 ó más	Muy Alto	1.00	14.52	0.00
					De 47.1 a 56.9	Alto	0.75		
					De 37.1 a 47.0	Medio	0.50		
					De 27.2 a 37.0	Bajo	0.25		
					De 17.2 a 27.1	Muy Bajo	0.00		
	Porcentaje de la población no derechohabiente	El porcentaje de la población no derechohabiente se obtiene dividiendo el total de la población no derechohabiente entre el total de la población y el resultado se multiplica por cien.	Este indicador muestra el porcentaje de la población no derechohabiente, la cual es la que menos acceso tiene a servicios de salud y en consecuencia es la que en menor medida acude a las instituciones de salud, esta situación incide directamente en la vulnerabilidad de la población.	Porcentaje de población no derechohabiente = (Población no derechohabiente / Población total) x 100	83.52 ó más	Muy Alto	1.00	39.4%	0.25
					De 67.05 a 83.51	Alto	0.75		
					De 50.58 a 67.04	Medio	0.50		
					De 34.11 a 50.57	Bajo	0.25		
					De 17.63 a 34.10	Muy Bajo	0.00		
						Promedio del indicador Salud			**0.42**

Fuente: Elaboración propia

Figura 255. Porcentaje de población no derechohabiente en la ciudad de Tulum

Fuente: Elaboración propia

Figura 256. Porcentaje de población no derechohabiente en el municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia

Indicadores de Educación

El estudio de la vulnerabilidad demuestra claramente que las características educativas ejercen una influencia significativa en la adopción de actitudes y conductas de autoprotección y prevención en un individuo. En México, la educación se considera uno de los derechos fundamentales que todos deben tener acceso, ya que juega un papel crucial en el bienestar de toda la población.

La educación proporciona a las personas las habilidades necesarias para comprender y evaluar los riesgos a los que se enfrentan, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre cómo protegerse a sí mismas y a los demás. Además, fomenta la conciencia social y la responsabilidad colectiva en la prevención de desastres y emergencias. En resumen, la educación es una poderosa herramienta que capacita a las personas para enfrentar de manera más efectiva los desafíos que puedan surgir en situaciones de riesgo.

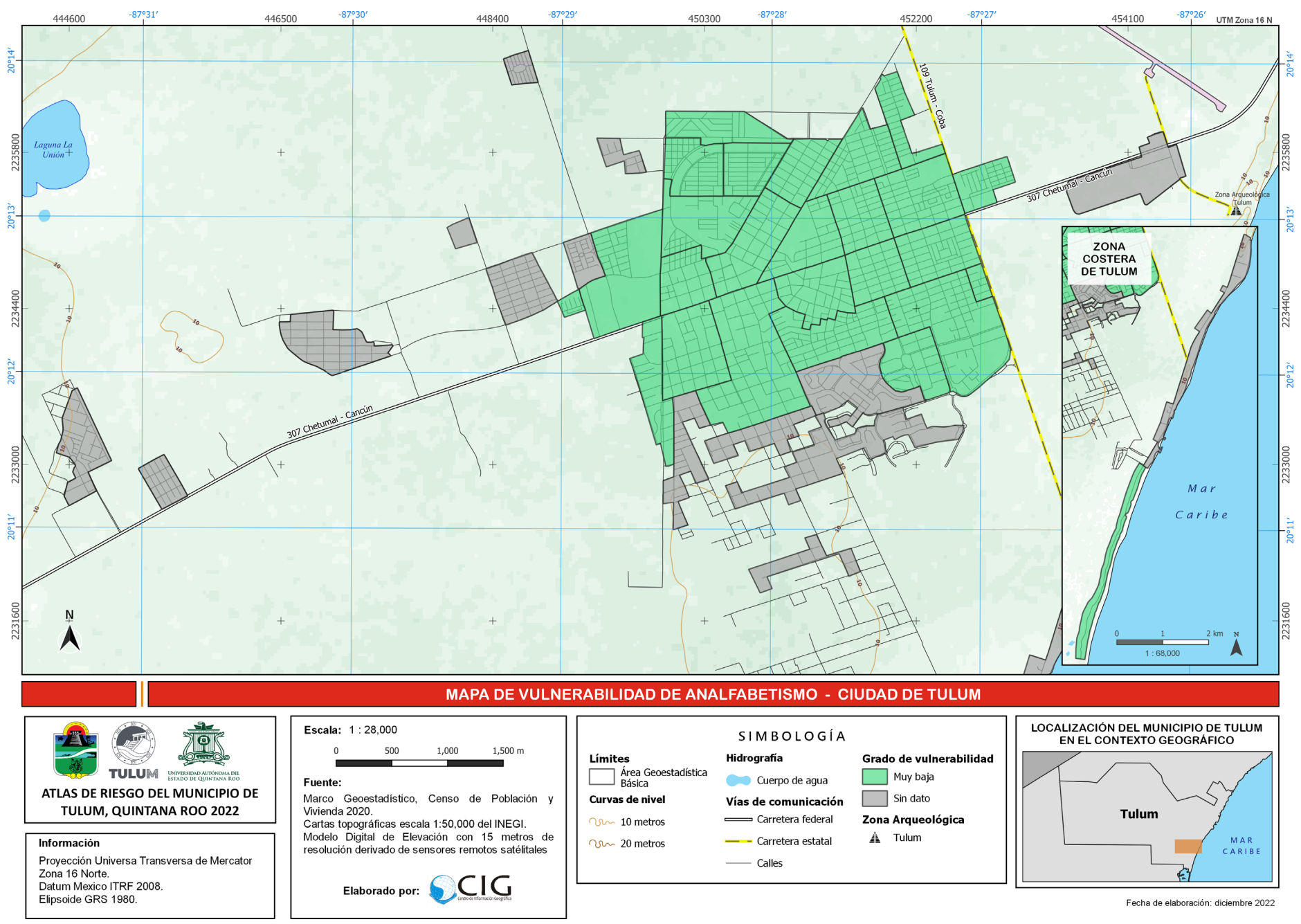
En México, el grado promedio de escolaridad es de alrededor de 10.2 años, en Tulum es de 9.3 años, mientras que el porcentaje de analfabetas es del 5% y el 88.66% de los niños entre 6 y 14 años asisten a una escuela.

Tabla 117. Indicadores de educación

Sector	Variable	Procedimiento	Justificación	Cálculo	Rangos	Grado de vulnerabilidad	Valor asignado	Rango del municipio	Calificación
Educación	Porcentaje de analfabetismo	Se obtiene dividiendo a la población analfabeta de 15 años y más entre el total de la población de ese mismo rango de edad. El resultado se multiplica por cien.	Además de las limitaciones directas que implica la carencia de habilidades para leer y escribir, es un indicador que muestra el retraso en el desarrollo educativo de la población, que refleja la desigualdad en el sistema educativo. La falta de educación es considerada como uno de los factores claves con respecto a la vulnerabilidad social.	%A = (Población de 15 años o más analfabeta / Población total de 15 años o mas) X 100	De 60.20 ó más	Muy Alto	1..00	5%	0.00
					De 45.42 a 60.19	Alto	0.75		
					De 30.64 a 45.41	Medio	0.50		
					De 15.89 a 30.63	Bajo	0.25		
					De 1.07 a 15.85	Muy Bajo	0.00		
Educación	Grado promedio de escolaridad	Este indicador lo proporciona el INEGI ya elaborado, lo obtiene de dividir la suma de los años< aprobados desde el primero de primaria hasta el último año alcanzado de las personas de 15 años y más entre el total de la población de 15 años y más. Incluye a la población de 15 años y más, excluye a la población de 15 años y más con grados no especificados en algún nivel y a la población con nivel de escolaridad no especificado.	Refleja a la población que cuenta con menos de nueve años de educación formal, la educación secundaria es obligatoria para la conclusión del nivel básico de educación. Se considerará a la población mayor de 15 años que no ha completado la educación secundaria como población con rezago educativo.	GPE = Suma de años aprobados desde primero de primaria hasta el último alcanzado de la población de 15 años y más / Población total de 15 años y más	De 1 a 3.2	Muy Alto	1..00	9.3 años	0.25
					De 3.3 a 5.4	Alto	0.75		
					De 5.5 a 7.6	Medio	0.50		
					De 7.7 a 9.8	Bajo	0.25		
					De 9.9 o más	Muy Bajo	0.00		
Educación	Porcentaje de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela	En algunos casos para la obtención del porcentaje de la cobertura de la demanda de la educación básica, se toma en cuenta la educación preescolar (a partir de los 3 años), otras sólo toman en cuenta desde la educación primaria hasta la educación secundaria; lo cual se estima dividiendo la matricula de educación primaria y secundaria entre la población de 6 a 14 años, que es el rango de edad de asistencia a tales niveles educativos.	El indicador muestra a la población que se encuentra en edad de demandar los servicios de educación básica, la cual es fundamental para continuar con capacitación posterior queproporcione las herramientas para acceder al mercado laboral.	DEB = (Población total de 6 a 14 años que asiste a la escuela / Población total de 6 a 14 años) X 100	De 42.72 a 54.17	Muy Alto	1..00	88.66%	0.00
					De 54.18 a 65.62	Alto	0.75		
					De 65.63 a 77.07	Medio	0.50		
					De 77.08 a 88.52	Bajo	0.25		
					88.53 ó más	Muy Bajo	0.00		
Promedio del indicador educación									**0.08**

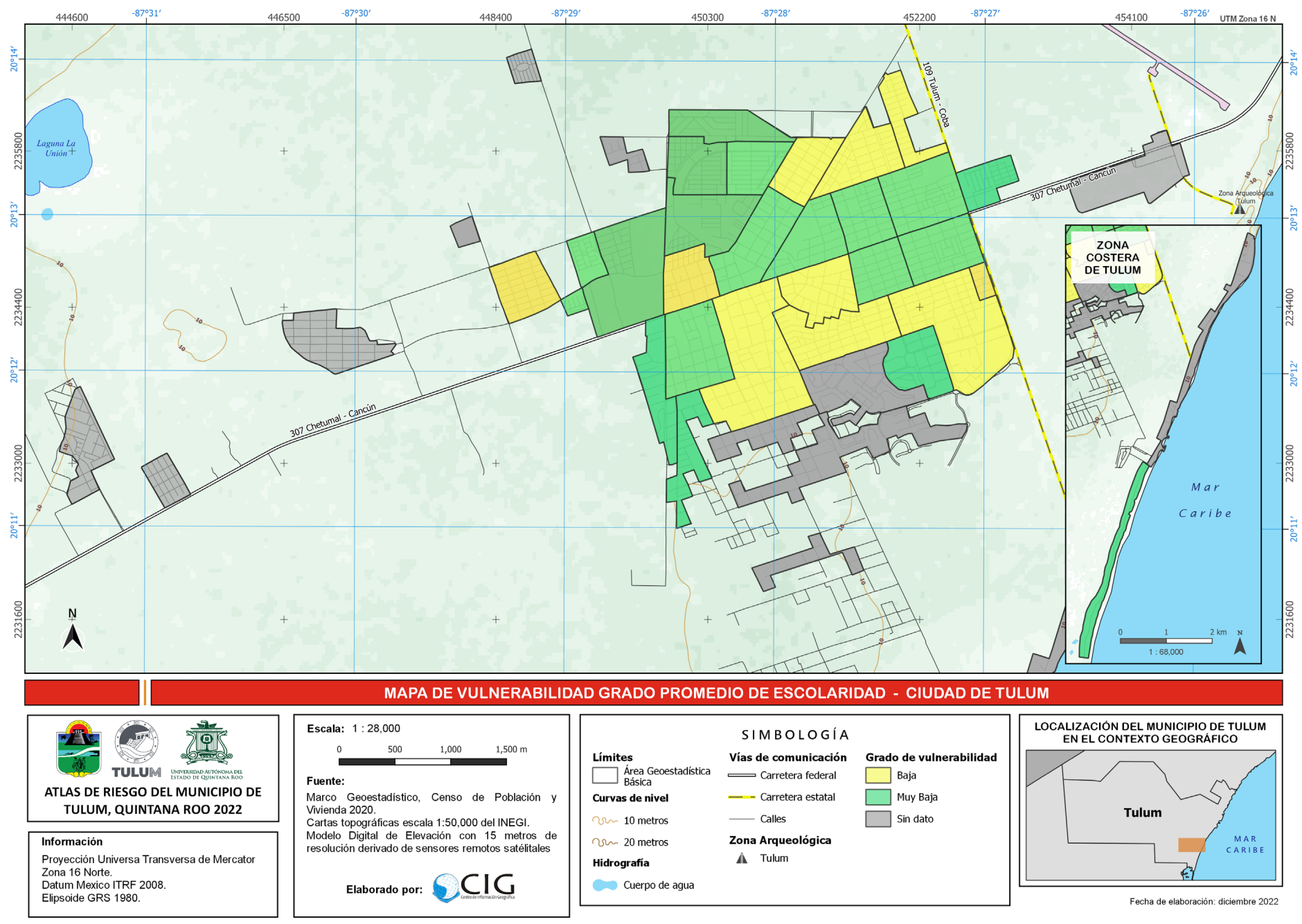
Fuente: Elaboración propia

Figura 257. Vulnerabilidad por población analfabeta para la ciudad de Tulum



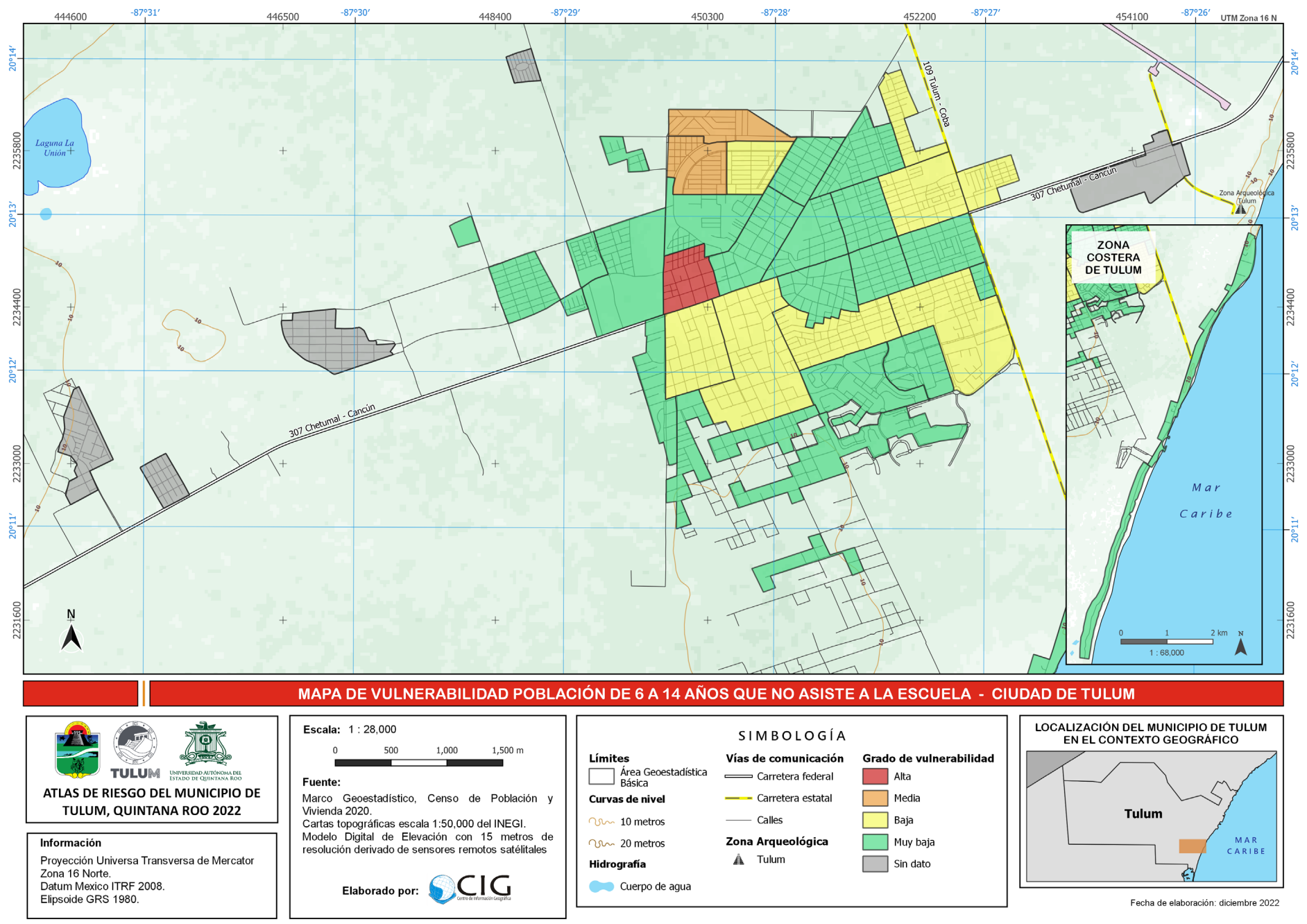
Fuente: Elaboración propia

Figura 258. Vulnerabilidad por grado promedio escolar para la ciudad de Tulum



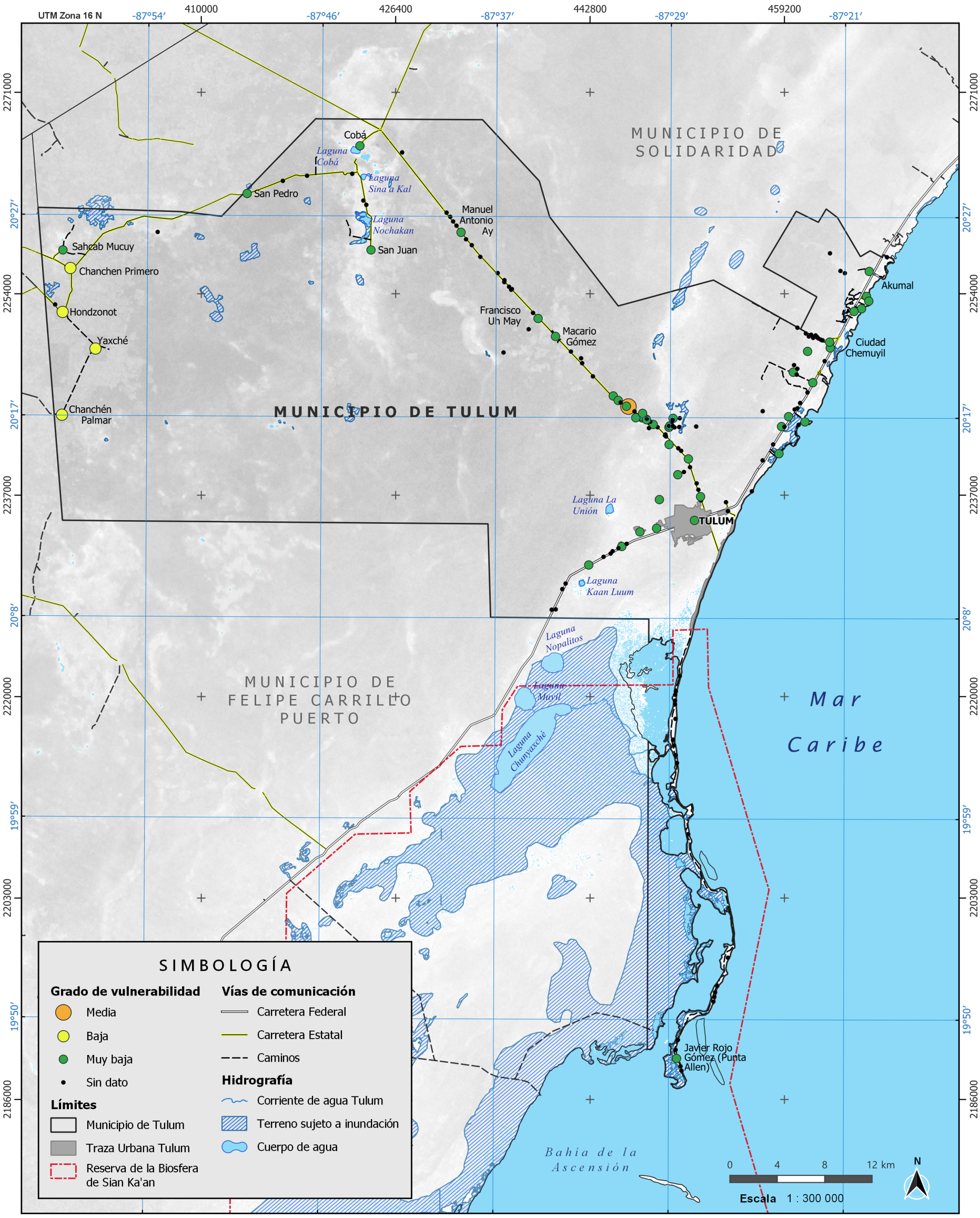
Fuente: Elaboración propia

Figura 259. Vulnerabilidad por población de 0 a 14 años que no asiste a la escuela para la ciudad de Tulum



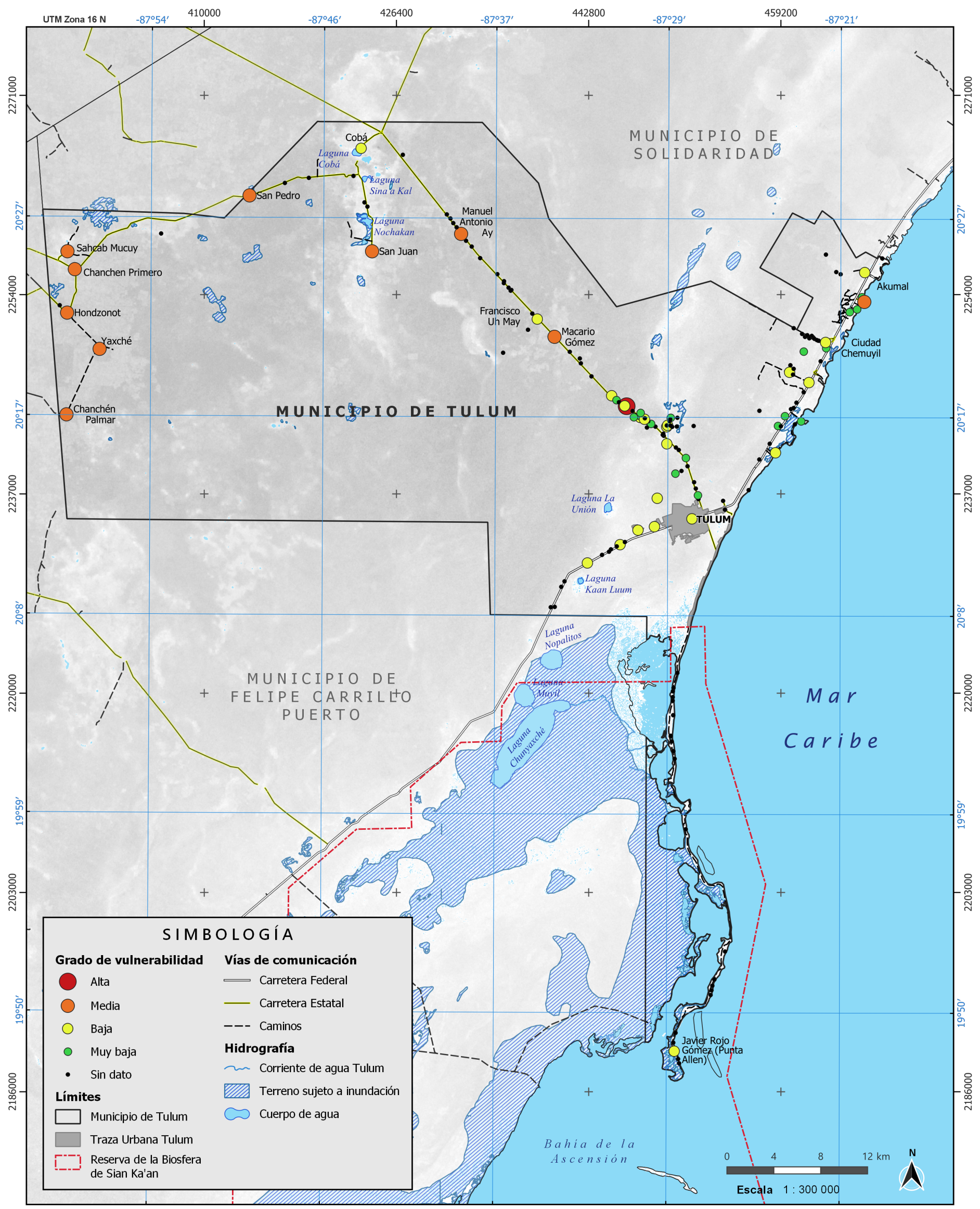
Fuente: Elaboración propia

Figura 260. Vulnerabilidad por población analfabeta para el municipio de Tulum

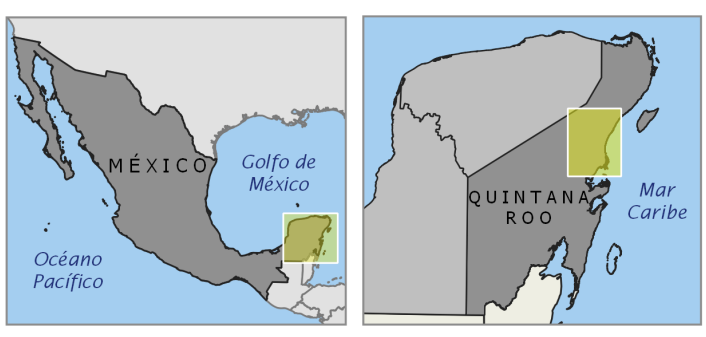


Fuente: Elaboración propia

Figura 261. Vulnerabilidad por grado promedio escolar para el municipio de Tulum



MAPA DE VULNERABILIDAD - GRADO PROMEDIO DE ESCOLARIDAD



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

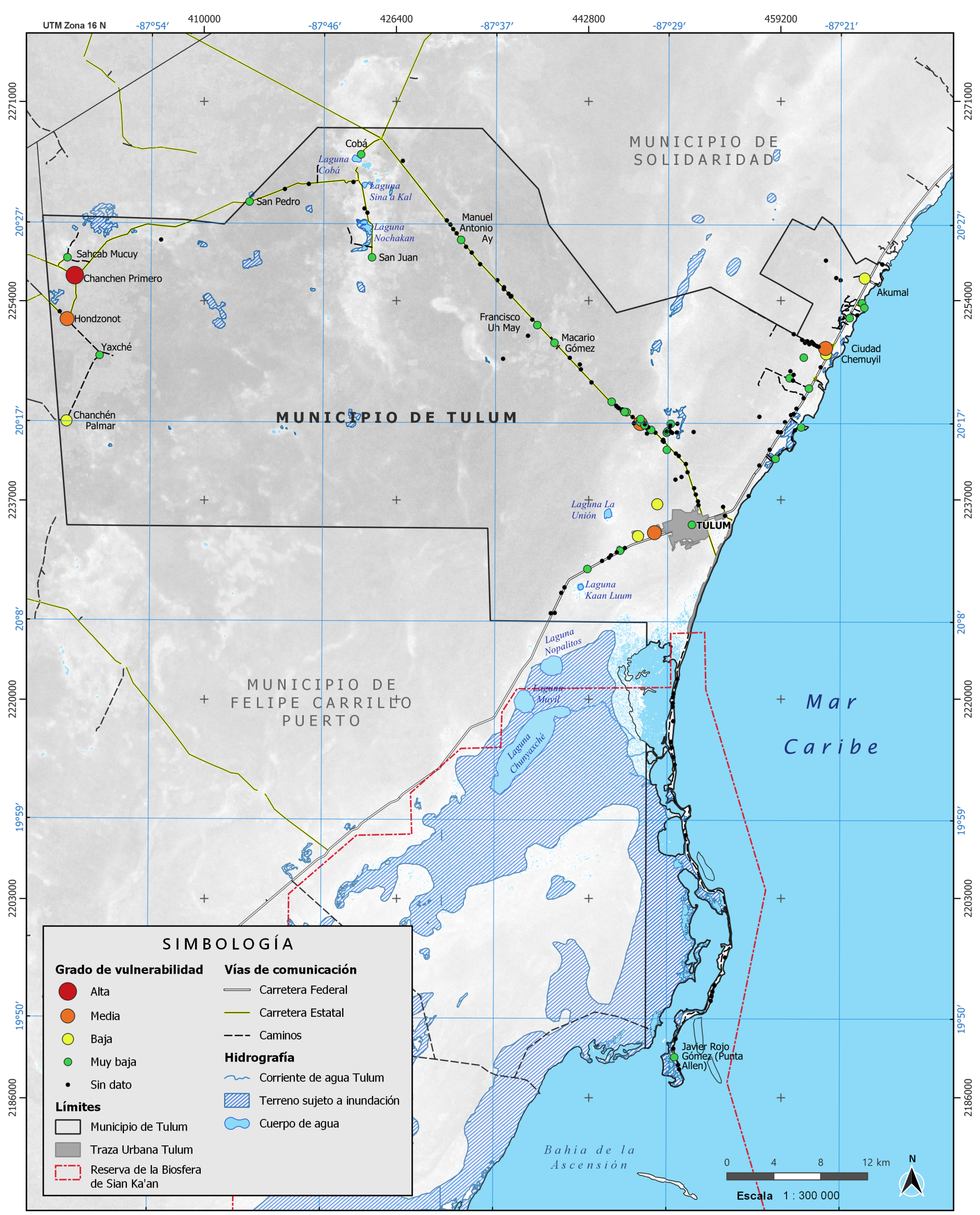
Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

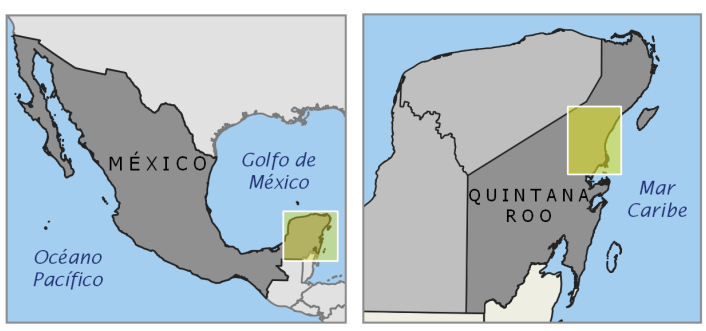
Fuente: Elaboración propia

Figura 262. Vulnerabilidad por población de 0 a 14 años que no asiste a la escuela para el municipio de Tulum



MAPA DE VULNERABILIDAD - POBLACIÓN DE 6 A 14 AÑOS QUE NO ASISTE A LA ESCUELA

LOCALIZACIÓN EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

TULUM
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Vivienda

La vivienda, como el principal componente del espacio social, desempeña un papel fundamental en la vida cotidiana de las personas. Es en este espacio donde gran parte de nuestras actividades diarias se desarrollan, y por ende, su accesibilidad y características tienen un impacto significativo en la calidad de vida de la población.

Es importante destacar que, en el contexto de desastres de origen natural, la vivienda es uno de los sectores más afectados. De hecho, los daños sufridos por las viviendas pueden servir como indicadores clave para medir la magnitud de los desastres. Cuando una vivienda presenta un estado precario, los factores de riesgo asociados con diversos fenómenos naturales aumentan en número e intensidad, lo que, a su vez, eleva las amenazas a la salud y seguridad de sus habitantes.

La vulnerabilidad de una vivienda puede manifestarse de múltiples formas, desde la calidad de los materiales de construcción utilizados hasta la disponibilidad de servicios básicos. En este sentido, se han considerado seis indicadores para evaluar el grado de vulnerabilidad de la población en relación con la calidad de sus viviendas.

Los primeros indicadores se centran en el acceso a servicios básicos, como el agua potable, la electricidad y el drenaje. La ausencia de estos servicios refleja la carencia de satisfactores para las necesidades básicas y de saneamiento de la población, lo cual incide directamente en la comodidad y en las condiciones de salud de los habitantes.

Si bien no es una norma estricta, es importante señalar que una gran cantidad de viviendas que carecen de servicios básicos suelen pertenecer al sector informal de la construcción. Estas viviendas tienden a ubicarse en zonas altamente expuestas a peligros naturales, áreas de reserva ecológica o fuera de los planes de desarrollo urbano, lo que las convierte en áreas altamente vulnerables.

Por tanto, para abordar adecuadamente la problemática de la vulnerabilidad de la vivienda, es necesario tomar en cuenta estos indicadores y trabajar en la implementación de políticas y estrategias que promuevan una construcción más segura y accesible, así como el acceso equitativo a servicios básicos para toda la población. Al hacerlo, estaremos contribuyendo a reducir la vulnerabilidad de la población y a mejorar la resiliencia ante futuros desastres naturales.

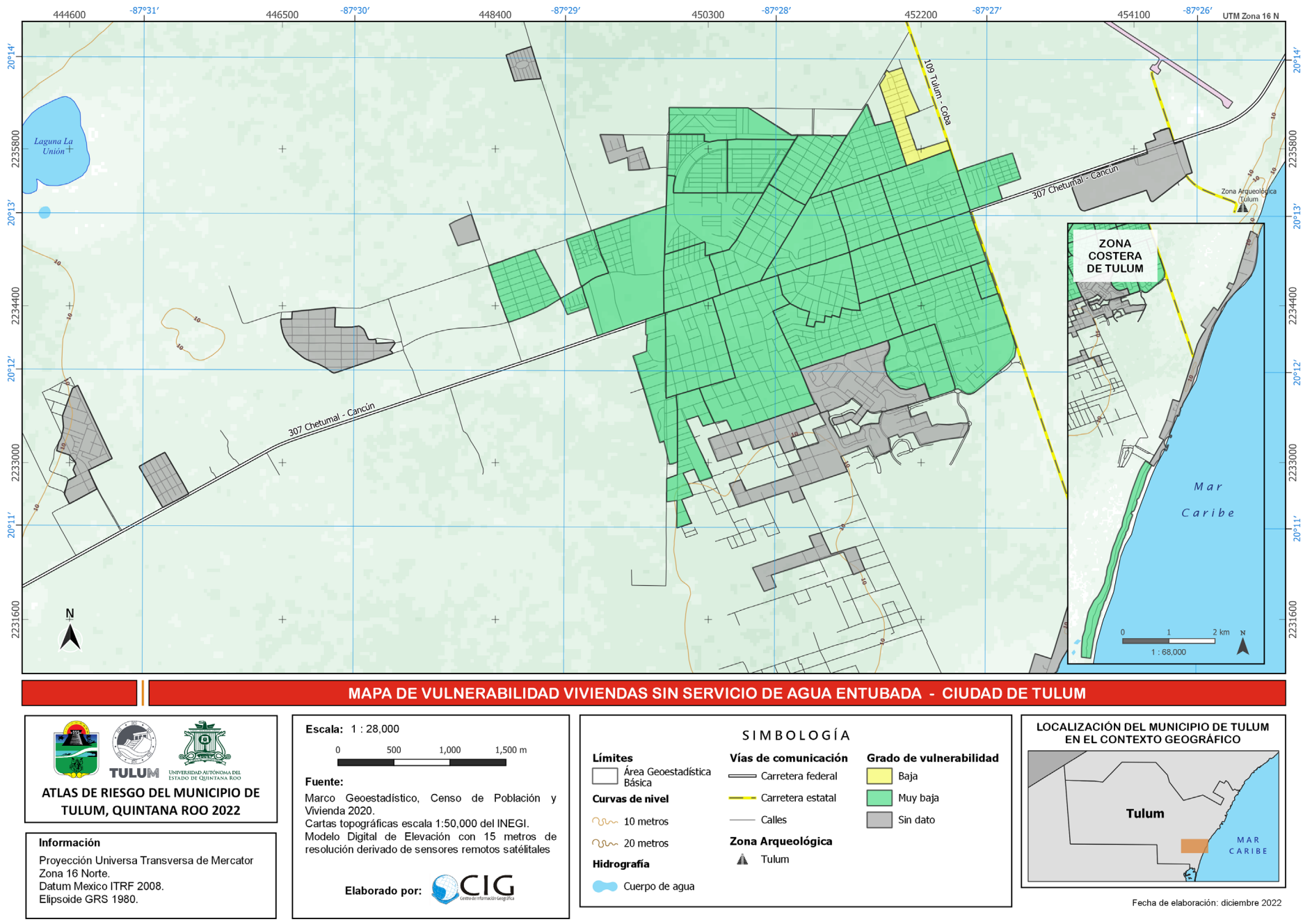
De acuerdo a los resultados del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020), en el municipio de Tulum el porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada es del 3.99%, mientras el porcentaje de viviendas sin drenaje es el 8.79% y sin servicio de energía eléctrica es del 3.32%. El 7.20% tienen pisos de tierra y existe un déficit de vivienda es del 7.20%.

Tabla 118. Indicadores de Vivienda

Sector	Variable	Procedimiento	Justificación	Cálculo	Rangos	Grado de vulnerabilidad	Valor asignado	Rango del municipio	Calificación
Vivienda	Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada	El porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada se obtiene de la diferencia del total de viviendas particulares habitadas y el total de viviendas particulares habitadas que disponen de agua entubada, el resultado se divide entre el total de viv, y se multiplica por cien.	La falta de agua entubada en caso de desastre puede llegar a retrasar algunas labores de atención, ya que el llevar al lugar agua que cumpla con las mínimas medidas de salubridad toma tiempo y regularmente la obtención y el almacenamiento de agua en viviendas que no cuentan con agua entubada se lleva a cabo de manera insalubre.	Viviendas particulares que no disponen de agua entubada = ((Viviendas particulares habitadas - Viviendas particulares habitadas que disponen de agua entubada) / Viviendas particulares habitadas)*100	79.85 ó más	Muy Alto	1..00	3.99%	0.00
					De 59.89 a 79.84	Alto	0.75		
					De 39.93 a 59.88	Medio	0.50		
					De 19.97 a 39.92	Bajo	0.25		
					De 0 a 19.96	Muy Bajo	0.00		
	Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	Se obtiene de la diferencia del total de viviendas particulares habitadas y el total de viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje. El resultado se divide entre el total de viviendas y se multiplica por cien.	La carencia de drenaje en una vivienda puede llegar a aumentar su vulnerabilidad frente a enfermedades gastrointestinales, las cuales en situaciones de desastre aumentan considerablemente.	Porcentaje de viviendas que no disponen de drenaje = ((Viviendas particulares habitadas - Viviendas particulares habitadas que disponen de drenaje) / Viviendas particulares habitadas) * 100	80.22 ó más	Muy Alto	1..00	8.79%	0.00
					De 60.47 a 80.21	Alto	0.75		
					De 40.72 a 60.46	Medio	0.50		
					De 20.97 a 40.71	Bajo	0.25		
					De 1.21 a 20.96	Muy Bajo	0.00		
	Porcentaje de viviendas sin servicio de electricidad	Este indicador se obtiene de la diferencia del total de viviendas particulares habitadas que disponen de energía eléctrica, el resultado se divide entre el total de viviendas y se multiplica por cien.	La falta de energía eléctrica aumenta la vulnerabilidad de las personas frente a los desastres naturales, ya que el no contar con este servicio excluye a la población deformas de comunicación, asimismo la capacidad de respuesta se puede retrasar.	Porcentaje de viviendas que no disponen de energía eléctrica = ((Viviendas particulares habitadas - Viviendas particulares que disponen de energía eléctrica) / Viviendas particulares habitadas) * 100	79.05 ó más	Muy Alto	1..00	3.32%	0.00
					De 59.29 a 79.04	Alto	0.75		
					De 39.53 a 59.28	Medio	0.50		
					De 19.77 a 39.52	Bajo	0.25		
					De 0 a 19.76	Muy Bajo	0.00		
	Porcentaje de viviendas con piso de tierra	Este porcentaje se obtiene de la diferencia del total de viviendas habitadas y el total de viviendas con piso de material diferente a tierra, el resultado se divide entre el total de viviendas habitadas y se multiplica por cien.	Las viviendas de piso de tierra aumentan la vulnerabilidad de sus habitantes frente a desastres naturales, ya que el riesgo de contraer enfermedades es mayor y su resistencia frente a ciertos fenómenos es menor que otro tipo de construcciones.	Porcentaje de viviendas con piso de tierra = (Viviendas particulares habitadas con piso de tierra / Viviendas particulares habitadas) * 100	78.73 ó más	Muy Alto	1.00	7.20%	0.00
					De 59.43 a 78.72	Alto	0.75		
					De 40.13 a 59.42	Medio	0.50		
					De 20.83 a 40.12	Bajo	0.25		
					De 1.52 a 20.82	Muy Bajo	0.00		
	Déficit de vivienda	El resultado representa tanto las viviendas nuevas que se requieren, sumado a las viviendas que necesitan mejoramiento. Para efectos de esta metodología el resultado deberá ser un porcentaje.	Aun cuando son diversos los factores que influyen en la determinación de los salarios, las remuneraciones guardan relación con la productividad en el trabajo, el indicador proporcionará de manera aproximada el porcentaje de la población que no puede satisfacer sus necesidades básicas.	Déficit de vivienda = ((Total de hogares - Viviendas particulares habitadas + Viviendas particulares habitadas con piso de tierra) / Viviendas particulares habitadas) * 100	50.00 ó más	Muy Alto	1.00	7.20%	0.00
					De 37.91 a 49.99	Alto	0.75		
					De 25.82 a 37.90	Medio	0.50		
					De 13.73 a 25.81	Bajo	0.25		
					De 1.63 a 13.72	Muy Bajo	0.00		
							Promedio del indicador Vivienda		0.00

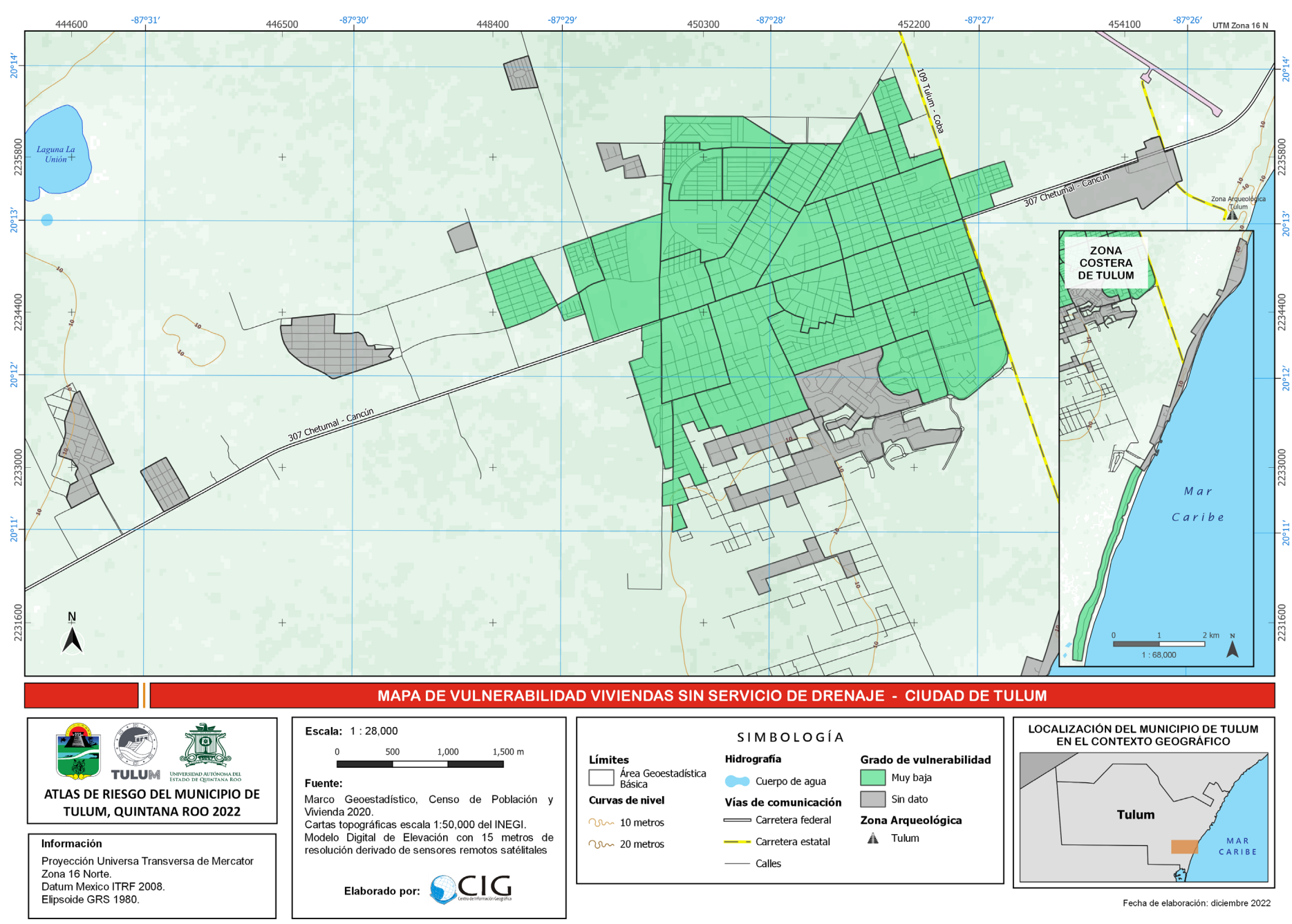
Fuente: Elaboración propia

Figura 263. Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada para la ciudad de Tulum.



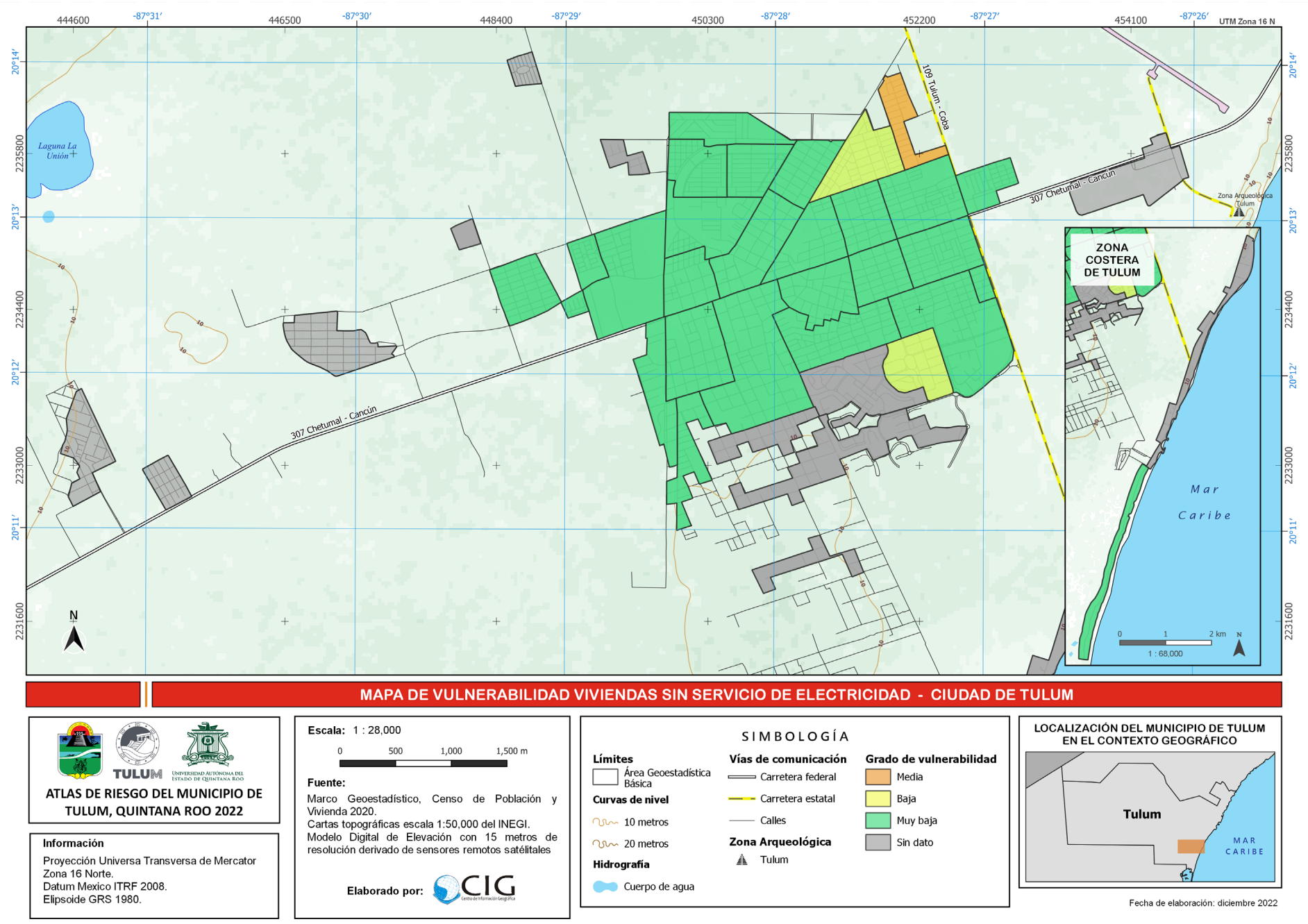
Fuente: Elaboración propia

Figura 264. Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje para la ciudad de Tulum.



Fuente: Elaboración propia

Figura 265. Porcentaje de viviendas sin servicio de electricidad para la ciudad de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD VIVIENDAS SIN SERVICIO DE ELECTRICIDAD - CIUDAD DE TULUM

TULUM
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Escala: 1 : 28,000

0 500 1,000 1,500 m

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

SIMBOLOGÍA

Límites
- Área Geoestadística Básica

Curvas de nivel
- 10 metros
- 20 metros

Hidrografía
- Cuerpo de agua

Vías de comunicación
- Carretera federal
- Carretera estatal
- Calles

Zona Arqueológica
- Tulum

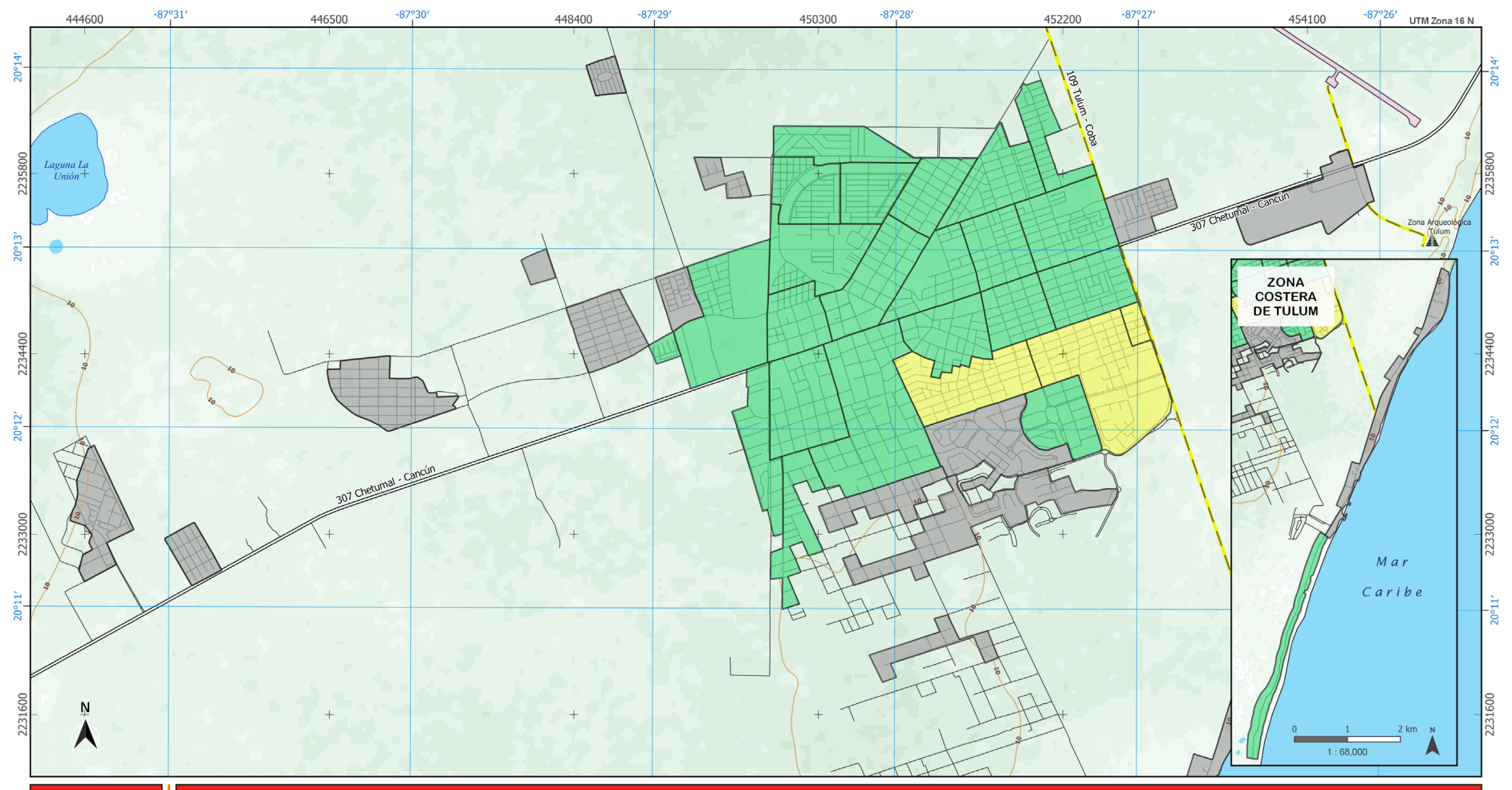
Grado de vulnerabilidad
- Media
- Baja
- Muy baja
- Sin dato

LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TULUM EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente: Elaboración propia

Figura 266. Porcentaje de viviendas con piso de tierra para la ciudad de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD VIVIENDAS CON PISO DE TIERRA - CIUDAD DE TULUM

TULUM
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Escala: 1 : 28,000

0 500 1,000 1,500 m

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

SIMBOLOGÍA

Límites
- Área Geoestadística Básica

Curvas de nivel
- 10 metros
- 20 metros

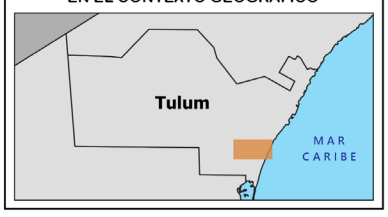
Hidrografía
- Cuerpo de agua

Vías de comunicación
- Carretera federal
- Carretera estatal
- Calles

Zona Arqueológica
- Tulum

Grado de vulnerabilidad
- Baja
- Muy baja
- Sin dato

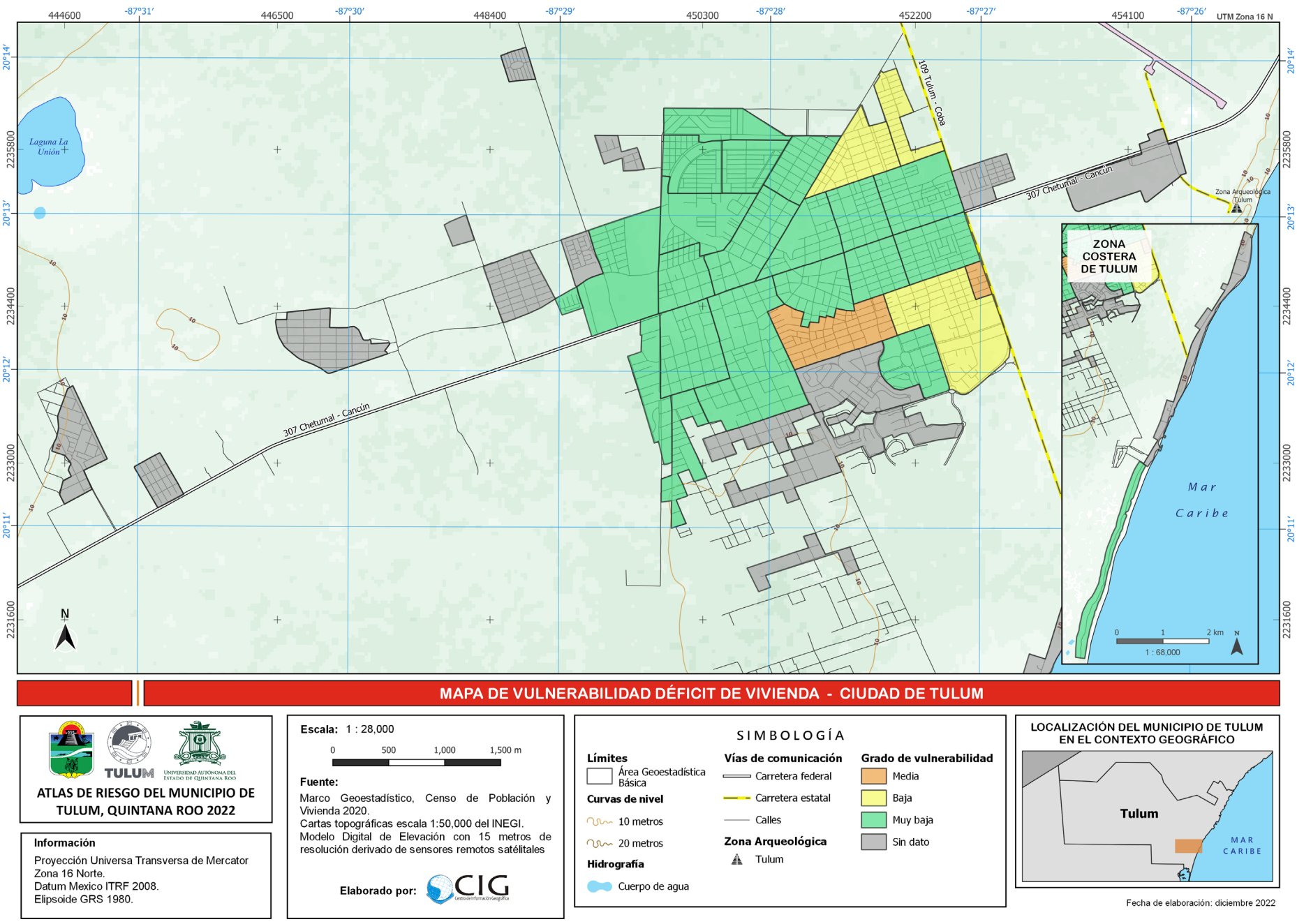
LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TULUM EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO



Fecha de elaboración: diciembre 2022

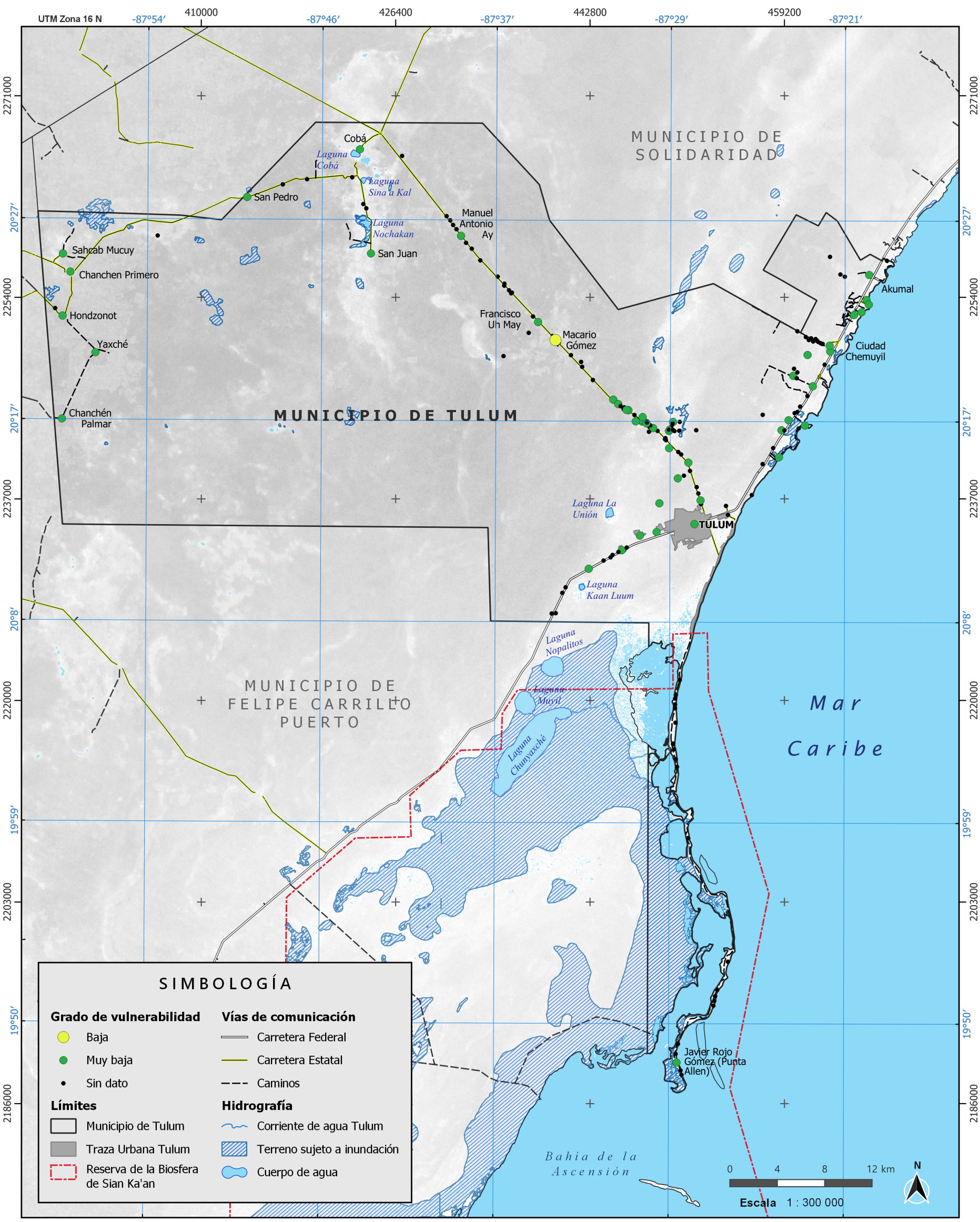
Fuente: Elaboración propia

Figura 267. Déficit de vivienda para la ciudad de Tulum.

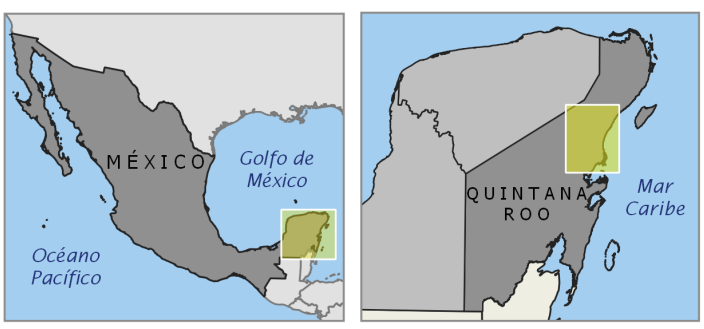


Fuente: Elaboración propia

Figura 268. Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada para el municipio de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD - VIVIENDAS SIN SERVICIO DE AGUA ENTUBADA



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

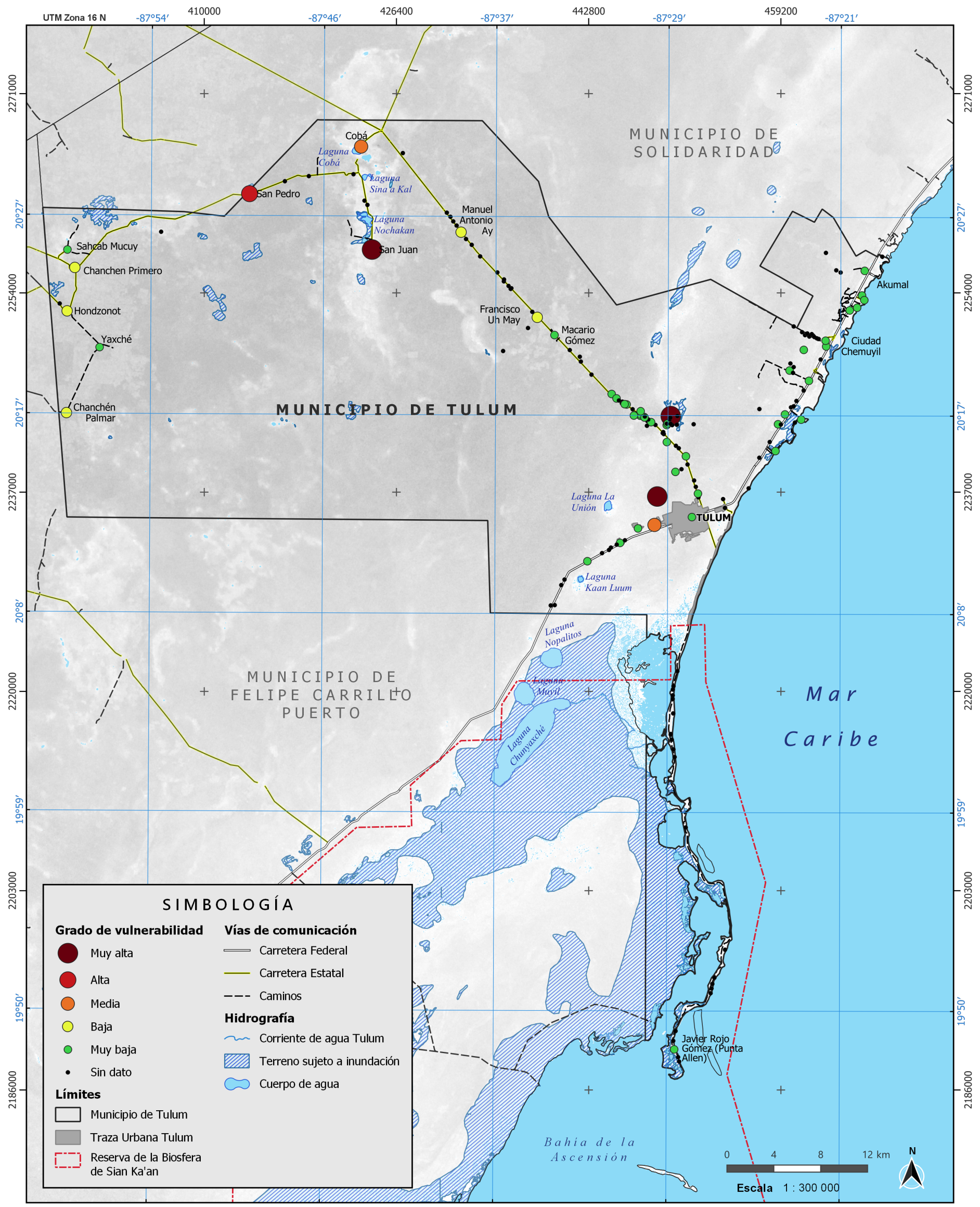
Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

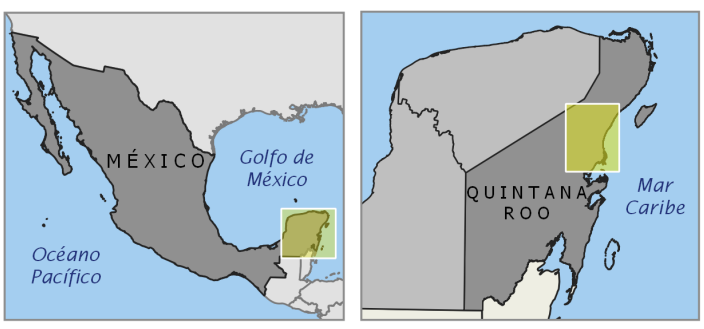
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Figura 269. Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje para el municipio de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD - VIVIENDAS SIN SERVICIO DE DRENAJE



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

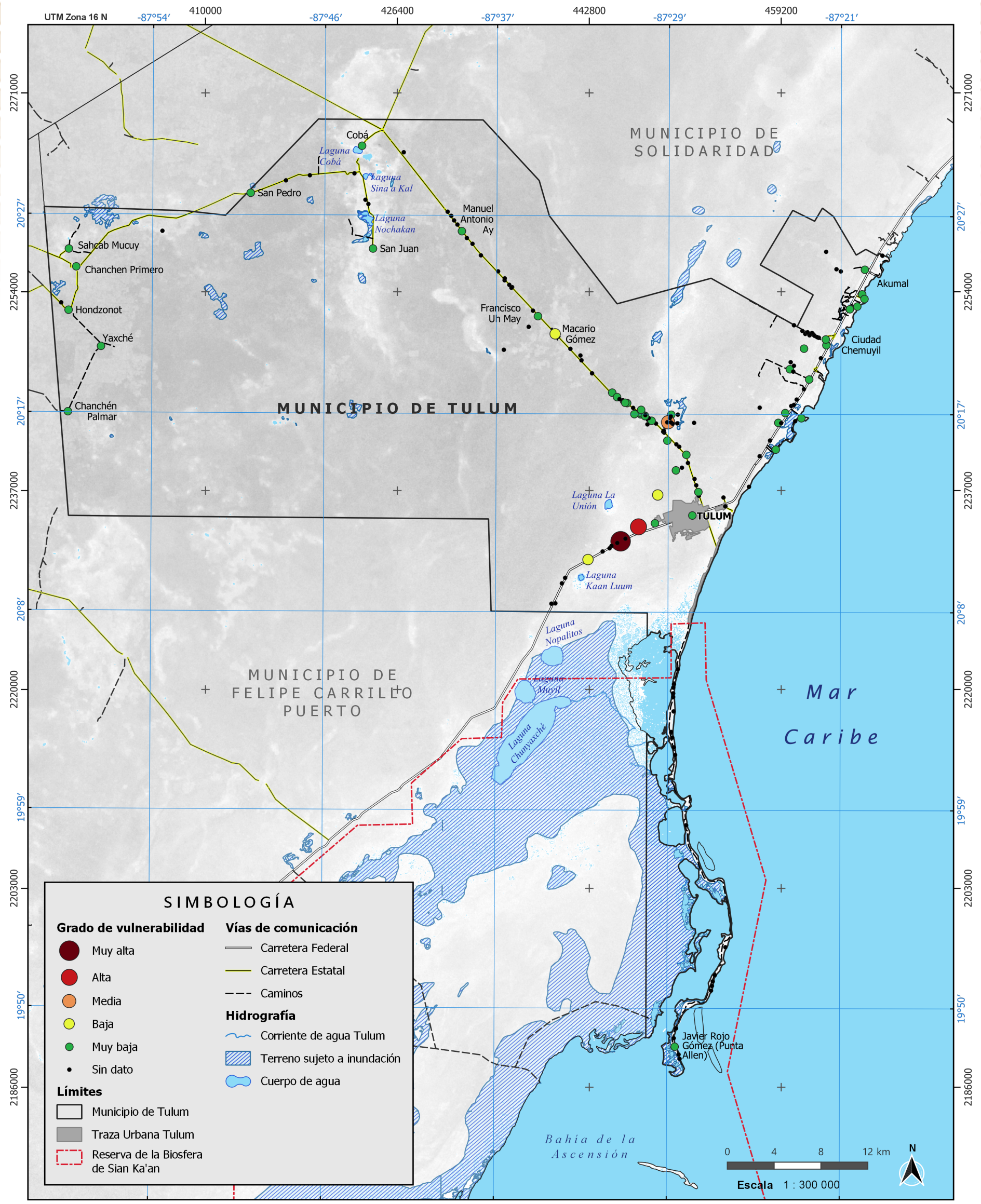
Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

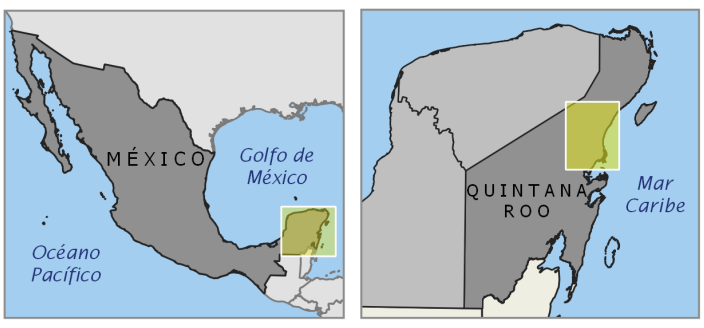
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Figura 270. Porcentaje de viviendas sin servicio de electricidad para el municipio de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD - VIVIENDAS SIN SERVICIO DE ELECTRICIDAD



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

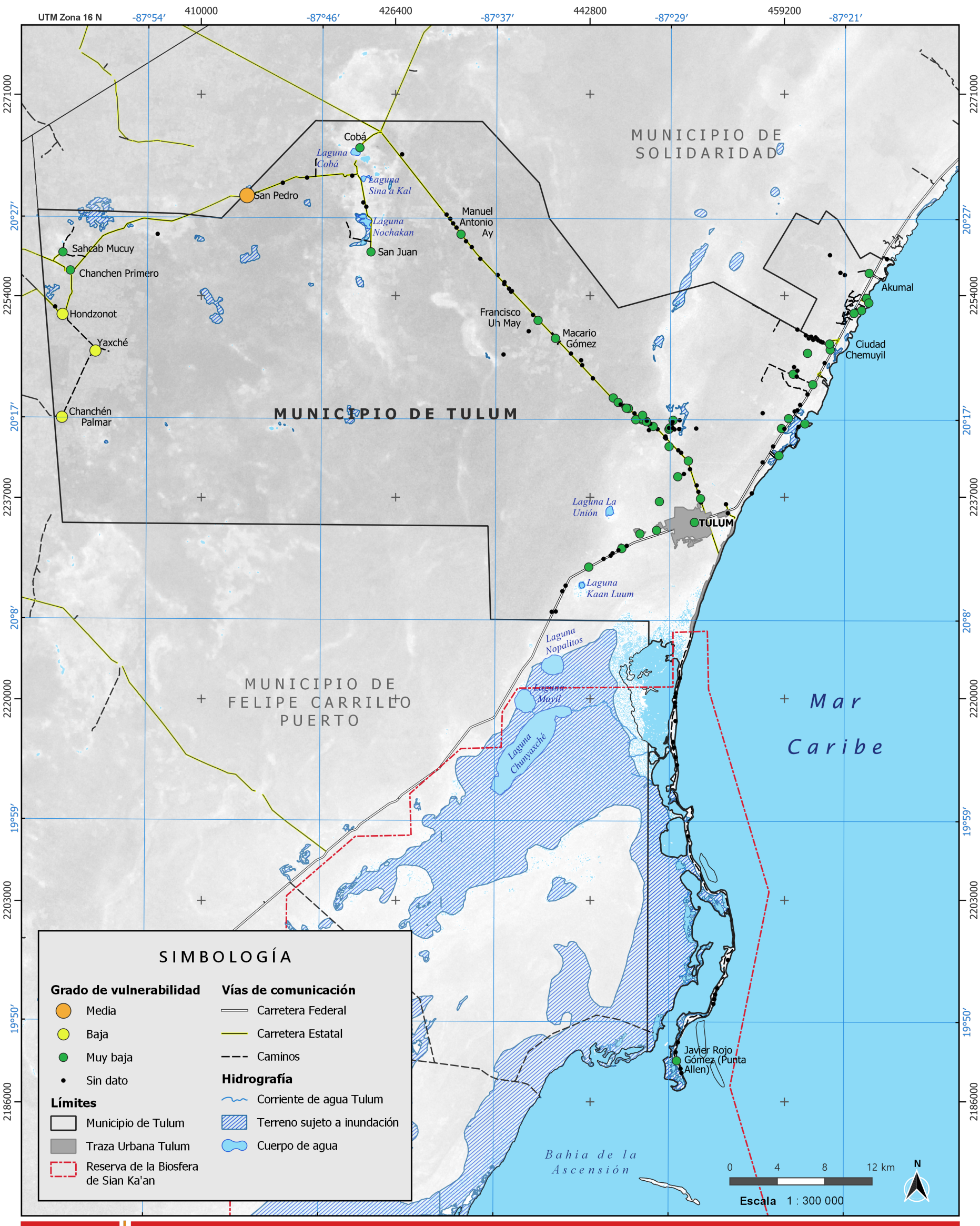
Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

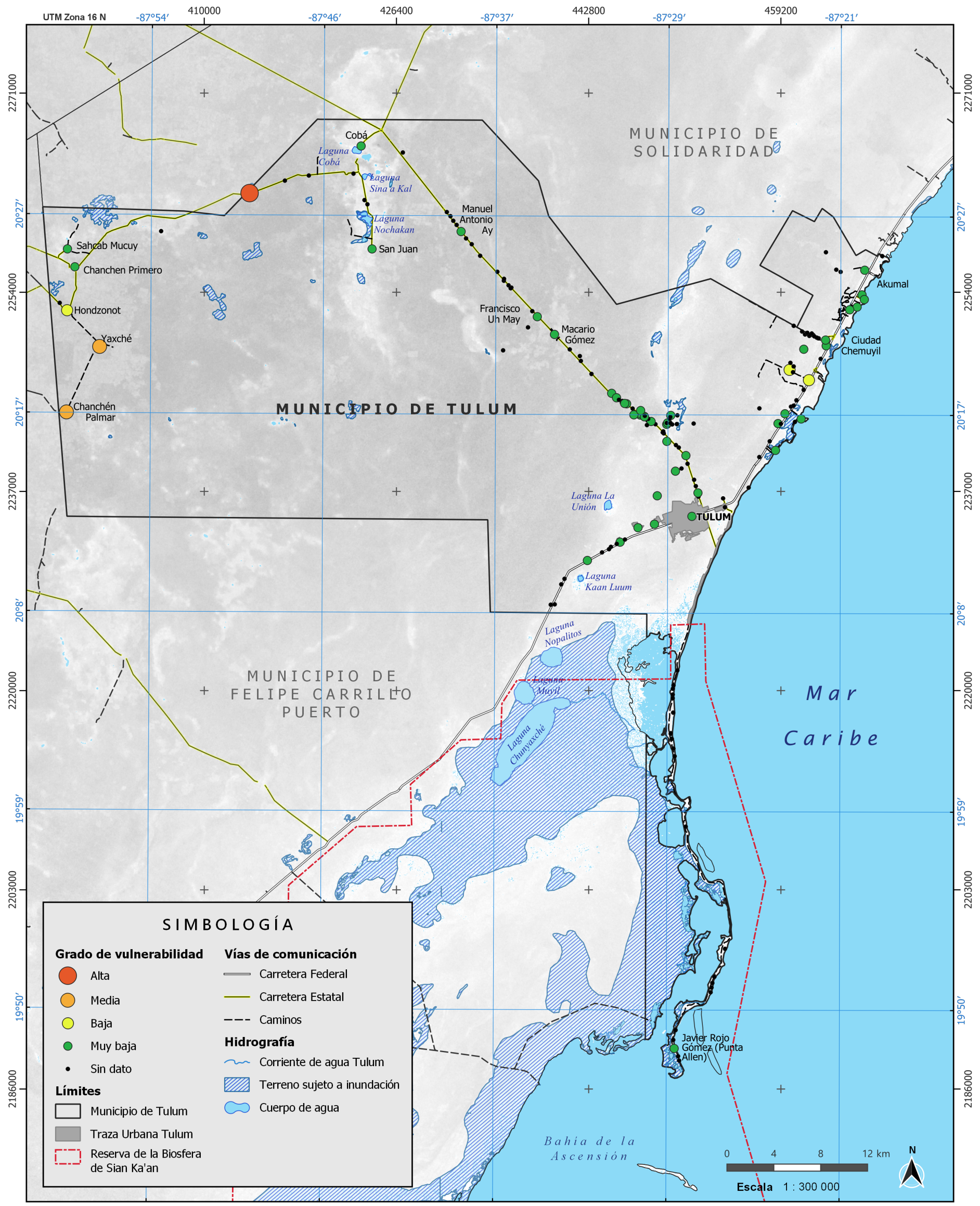
Fuente: Elaboración propia

Figura 271. Porcentaje de viviendas con piso de tierra para el municipio de Tulum.

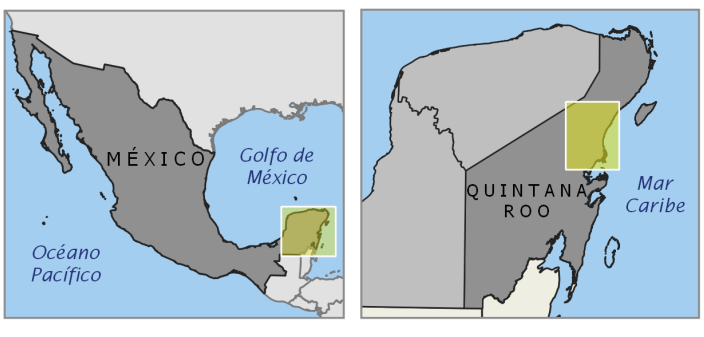


Fuente: Elaboración propia

Figura 272. Déficit de vivienda para el municipio de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD - DÉFICIT DE VIVIENDA



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Empleo e ingresos

Es crucial prestar especial atención a los indicadores de la condición de empleo e ingresos, los cuales nos permiten vislumbrar una situación vulnerable tanto en el corto plazo, donde la calidad de vida es precaria y las familias de bajos ingresos luchan por satisfacer sus necesidades inmediatas, como en el largo plazo, donde la vulnerabilidad puede aumentar frente a la falta de capacidad de prevención y respuesta ante desastres. En este rubro, se destacan tres indicadores esenciales. La metodología considera la relevancia de estos indicadores, no solo para evaluar la situación actual, sino también para implementar medidas efectivas que ayuden a reducir la desigualdad y fortalecer la capacidad de las personas para afrontar situaciones adversas.

Como se ha señalado antes, Tulum centra su actividad económica en su sector terciario (75%), principalmente, en las actividades relacionadas con el turismo, tales como los servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas. El secundario tiene su eje en la construcción e industrias manufactureras, debido a su crecimiento y expansión hotelera, y finalmente, su sector primario es el que menos población ocupada tiene con solo un 1%.

La Población Económicamente Activa (PEA) es el grupo social constituido por todas las personas que suministran la mano de obra disponible para la producción de bienes y servicios (Peralta, 2016).

La PEA para el municipio de Tulum para un total de 46,721 personas es de 25,969, lo que es un 55.58% del total de la población.

Por otro lado, un factor esencial que acentúa la pobreza es la falta de empleo ha sido, que es uno de los problemas sociales más graves de México (Ruiz & Ordaz, 2011). El indicador de Tasa de desempleo abierto permite distinguir las condiciones del mercado laboral. Para el municipio de Tulum es del 0.78%.

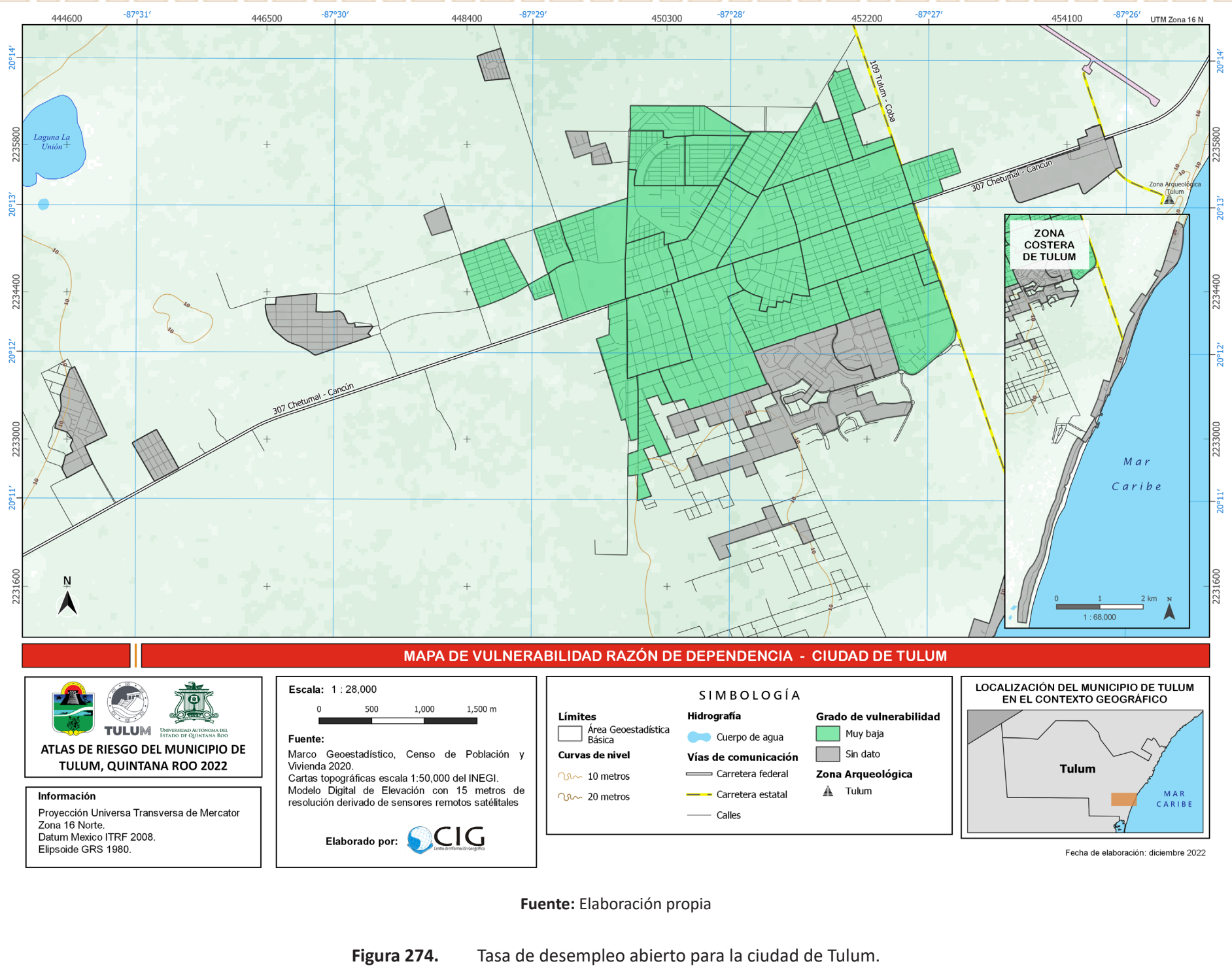
La Razón de dependencia económica es un índice demográfico que expresa la proporción de personas dependientes sobre la población que está en edad de trabajar. Este indicador es muy utilizado para conocer la sostenibilidad del sistema de pensiones, ya que muestra la proporción de personas en edad de trabajar que financian una pensión. Para Quintana Roo la razón de dependencia fue de 41.54% para 2020 (INEGI, 2020). Es decir, hay 42 personas por cada 100 personas en edades productivas. Para el municipio del Tulum es del 45.38%, es decir que hay 45 personas en edad productiva por cada 100.

Tabla 119. Indicadores de vivienda

Sector	Variable	Procedimiento	Justificación	Cálculo	Rangos	Grado de vulnerabilidad	Valor asignado	Rango del municipio	Calificación
Empleo e ingresos	Razón de dependencia	La razón de dependencia se obtiene de la suma del total de las personas que por su edad se consideran como dependientes (menores de 15 años y mayores de 64 años) entre el total de personas que por su edad se identifican como económicamente productivas (mayores de 15 años y menores de 64 años).	Mientras mayor sea la razón de dependencia, más personas se verán en desventaja frente a un desastre de origen natural ya que su capacidad de respuesta y prevención prácticamente va a ser nula.	Razón de dependencia = ((Población de 0 a 14 años + Población de 65 años y más) / Población de 15 a 64 años) * 100	117.60 ó más	Muy Alto	1..00	45.38%	0.00
					De 97.64 a 117.60	Alto	0.75		
					De 77.67 a 97.63	Medio	0.50		
					De 57.70 a 77.66	Bajo	0.25		
					De 37.72 a 57.69	Muy bajo	0.00		
	Tasa de desempleo abierto	Para obtener la Tasa de Desempleo Abierto es necesario dividir el número de personas desocupadas entre la PEA y multiplicar el resultado por cien.	Este indicador se refiere directamente a la situación de desempleo que influye sobre la capacidad de consumo de la población, así como en la capacidad de generar los recursos que posibiliten la adquisición de bienes satisfactorios.	Tasa de desempleo abierto = Número de personas desocupadas / Población económicamente activa	12.37 ó más	Muy Alto	1.00	0.78%	0.00
					De 9.28 a 12.36	Alto	0.75		
					De 6.19 a 9.27	Medio	0.50		
					De 3.10 a 6.18	Bajo	0.25		
					De 0 a 3.09	Muy bajo	0.00		
Promedio del indicador Empleo e ingresos								**0.00**	

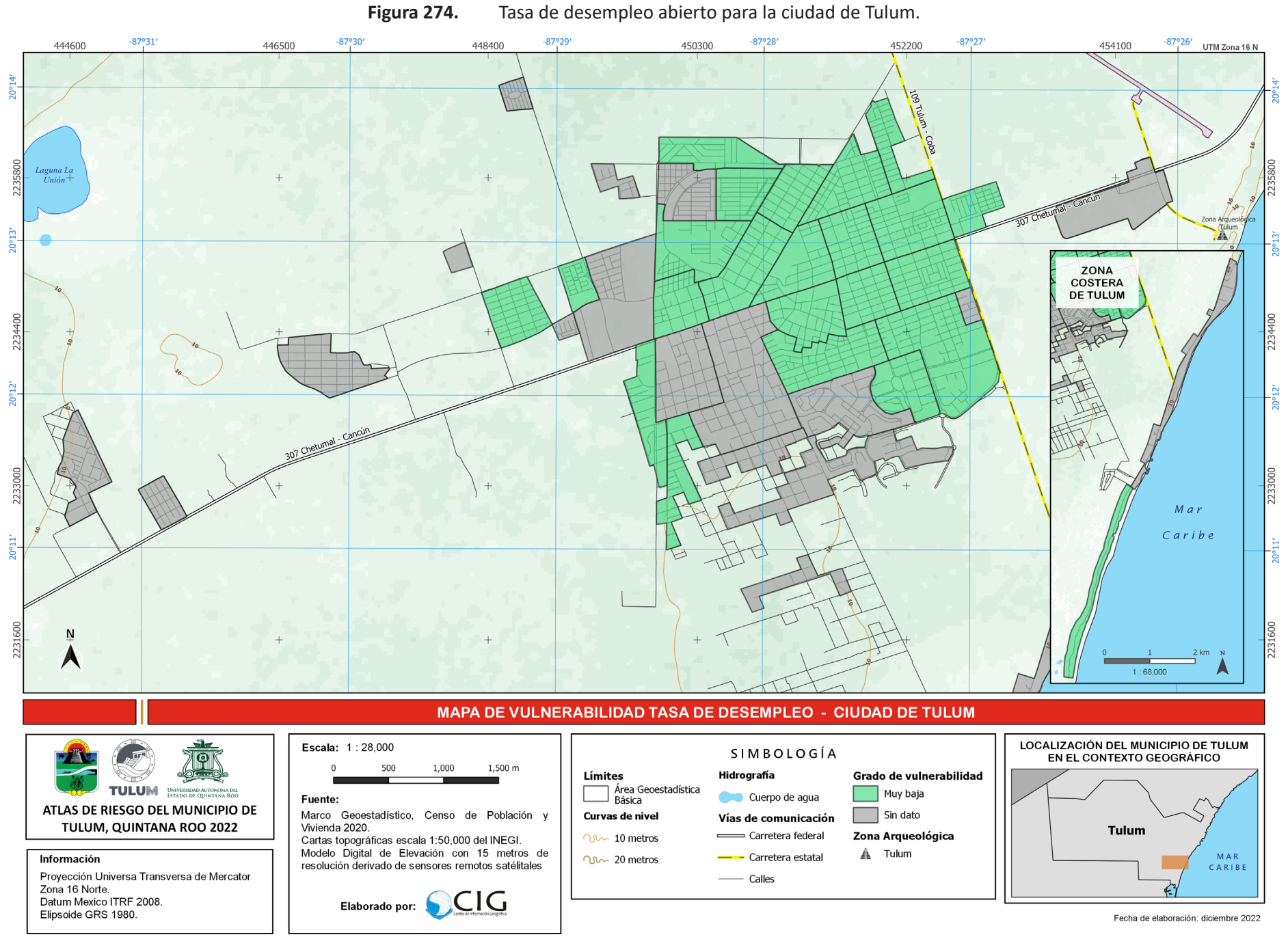
Fuente: Elaboración propia

Figura 273. Razón de dependencia para la ciudad de Tulum.



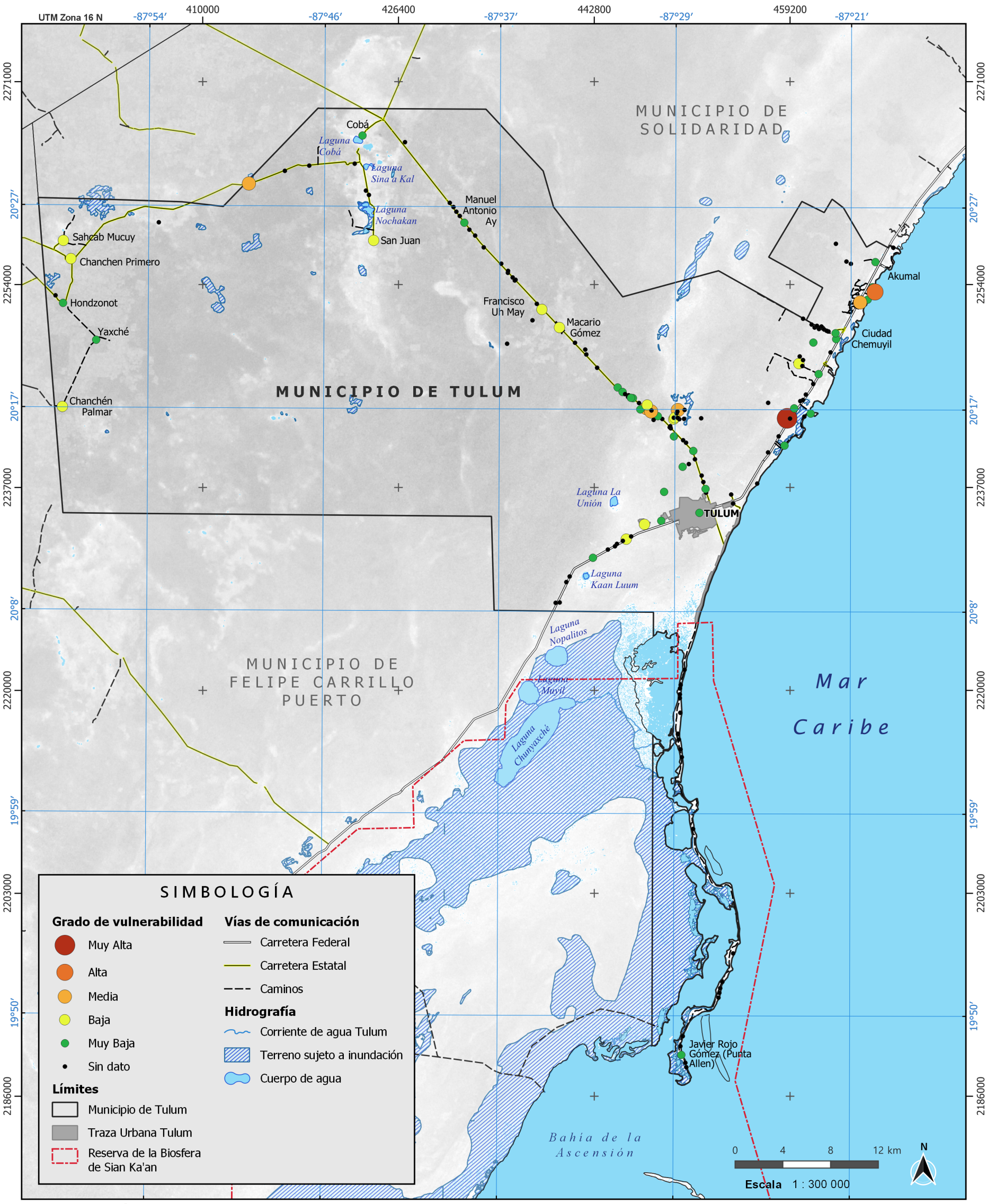
Fuente: Elaboración propia

Figura 274. Tasa de desempleo abierto para la ciudad de Tulum.



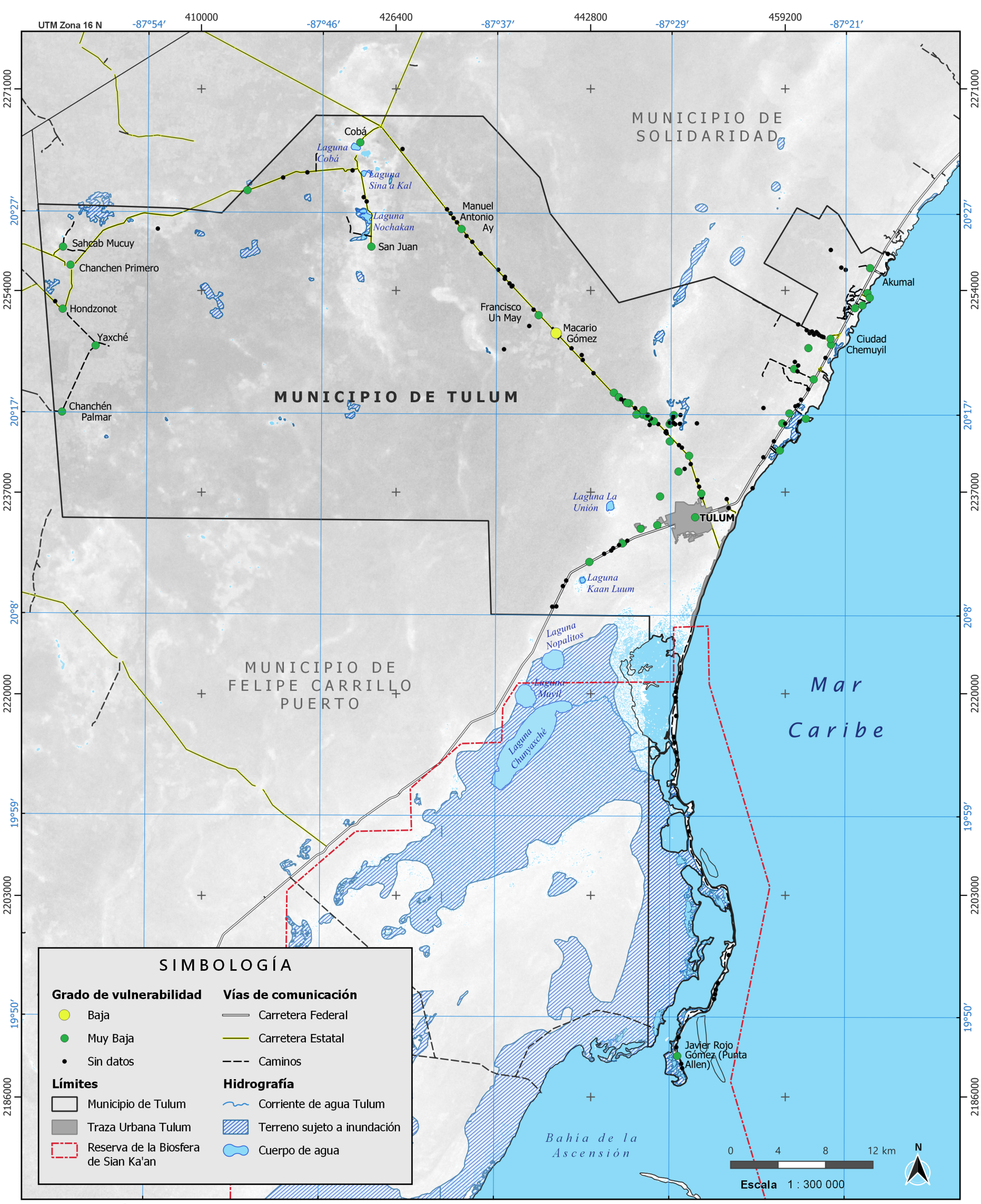
Fuente: Elaboración propia

Figura 275. Razón de dependencia para el municipio de Tulum.

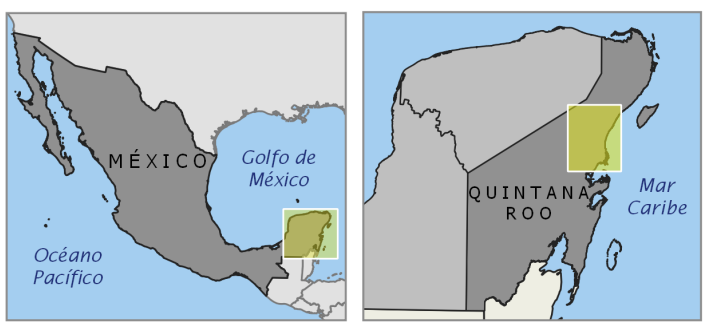


Fuente: Elaboración propia

Figura 276. Tasa de desempleo abierto para el municipio de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD - TASA DE DESEMPLEO



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

Población

Este apartado se compone de tres indicadores y se aborda el tema de los grupos étnicos en la población, mismos que poseen características culturales y sociales únicas que los distinguen. Sus condiciones de vida a menudo están relacionadas con desigualdades históricas y culturales. Lamentablemente, muchos de estos grupos étnicos enfrentan marginación y discriminación, lo que los convierte en uno de los sectores más vulnerables y desfavorecidos de nuestro país.

Se analiza la distribución y dispersión de los asentamientos humanos, lo que nos permite entender cómo la población se agrupa y establece en diferentes áreas. Este aspecto es crucial para identificar patrones de urbanización, densidad poblacional y acceso a servicios básicos, lo que a su vez puede impactar en la calidad de vida de las comunidades.

Un aspecto a considerar es la distribución de los asentamientos humanos, que se refiere a cómo se distribuye la población en el territorio nacional. Esto nos proporciona una visión más amplia de las disparidades regionales y la concentración de población en áreas específicas. Además, nos permite comprender las dinámicas migratorias y los factores que impulsan a las personas a trasladarse de una región a otra.

De acuerdo con el INEGI (2020), la población total del municipio de Tulum es de 46,721 habitantes, la mayor parte (71%) se concentra en la ciudad de Tulum, la capital municipal con 33, 374 habitantes. En 40 de las 177 localidades hay habitantes que hablan alguna lengua indígena, incluso algunas comunidades tienen población mayor a tres años que solo habla alguna lengua indígena pero no español, tal es el caso de Yaxché (23%) o Sahcab Mucuy y Chanchén Palmar con el 14.6% cada una. A nivel municipal hay 11,088 personas que hablan alguna lengua indígena lo que representa el 24% de la población total.

La población del municipio representa el 2.5% del Estado con un promedio de 3.33 integrantes por hogar. La densidad poblacional es de 23 habitantes por km² (0.23 Hab/ha) y el 84.4% de la población se concentra en cinco localidades: Tulum, Akumal, Cobá, Francisco Uh May y Chanchén Primero. Tomando la definición de INEGI para localidades urbanas (>= 2,500 hab.), el municipio de Tulum solo cuenta con 1 localidad urbana (Tulum), el resto se consideran rurales (176).

El total de la superficie contemplada integral para la ciudad de Tulum fue de 1,263 hectáreas (12.63 km2) con una población total de 33,837 habitantes (INEGI, 2020), por lo consiguiente la densidad de población para la ciudad de Tulum es de 27 habitantes por hectárea.

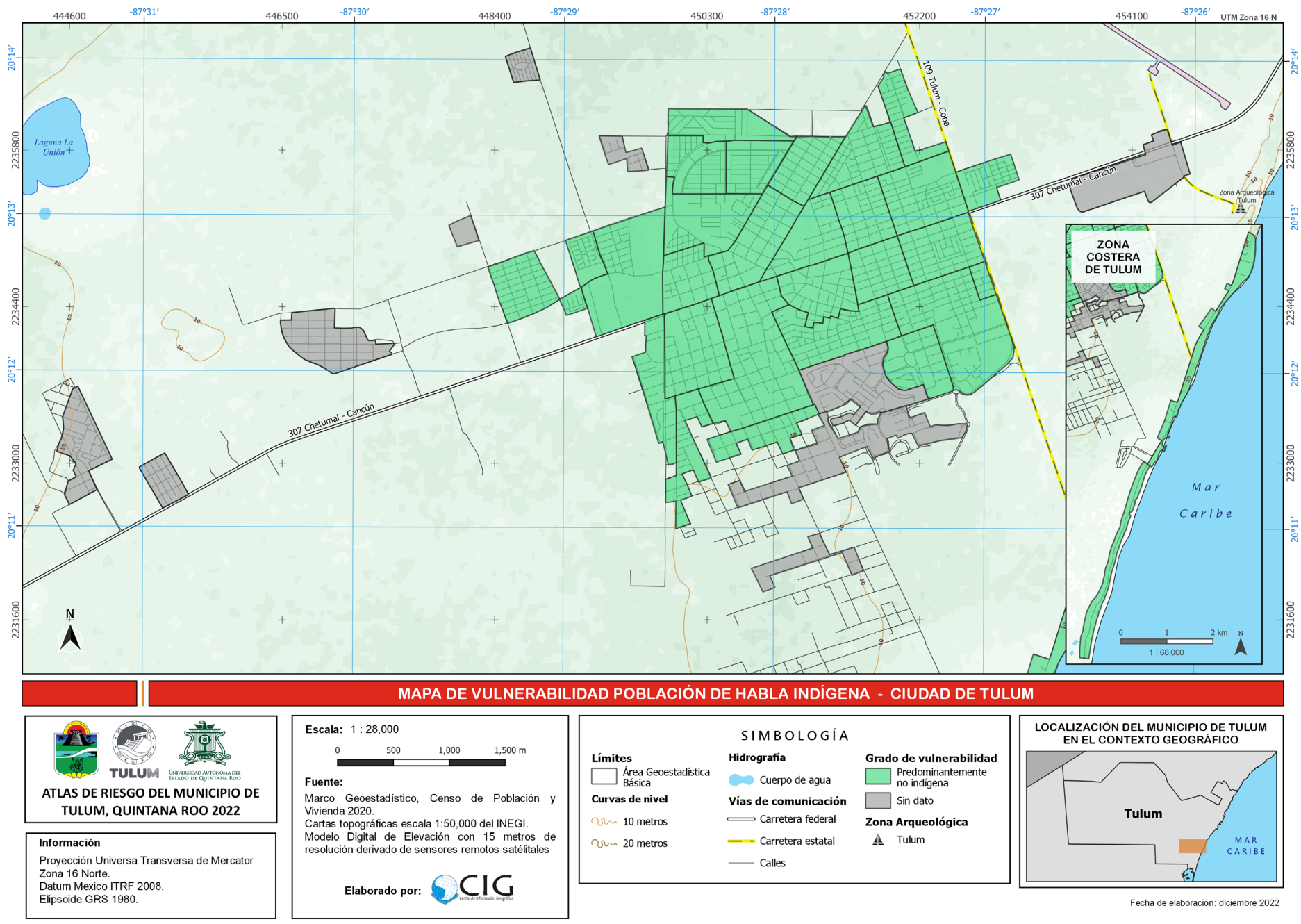
Como se mencionó en el apartado 4.3 de la Fase I, se calculó la densidad poblacional para las 10 localidades con mayor población del municipio, teniendo como criterio un mínimo de 500 habitantes. Con este criterio, la localidad con menos habitantes es Ciudad Chemuyil (548 habitantes) con un área superficial de 14 hectáreas y una densidad de 39 hab/ha y la mayor Akumal con 2,154 habitantes y una densidad de 35 hab/ha.

Tabla 120. Indicadores de población

Sector	Variable	Procedimiento	Justificación	Cálculo	Rangos	Grado de vulnerabilidad	Valor asignado	Rango del municipio	Calificación
Población	Porcentaje de la población de habla indígena	Se obtiene de dividir a la población de 5 años y más que habla alguna lengua indígena entre el total de la población de 5 años y más, el resultado se multiplica por cien. El INEGI establece que para considerar a una población predominantemente indígena al menos el 40% de la población debe hablar alguna lengua indígena.	La mayoría de los municipios donde se asienta la población indígena presenta una estructura de oportunidades muy precaria, lo cual se refleja en condiciones de vulnerabilidad de esta población.	Porcentaje de población indígena = (Población de 5 años y más que habla una lengua indígena / Población de 5 años y más) * 100	Más del 40% de la población	Predominantemente indígena	1.00	24%	0.00
					Menos del 40% de la población	Predominantemente no indígena	0.00		
	Densidad de población	Se obtiene de dividir el total de la población de un territorio determinado entre la superficie del mismo. El resultado indica el número de habitantes por kilómetro cuadrado.	La densidad, más que un problema de sobrepoblación, refleja un problema de mala distribución de la población, además de que la tasa de crecimiento es elevada, el problema se agudiza por la migración del medio rural a las ciudades. Cuando la gente se encuentra concentrada en un área limitada, una amenaza natural puede tener un impacto mayor.	Densidad de población = Población total / Superficie territorial	Más de 50 hab por ha	Muy Alto	1..00	27 habitantes por km2 o 0.23 habitantes por hectárea	0.00
					De 10 a 49 hab por ha	Alto	0.75		
					De 5 a 9 hab por ha	Medio	0.50		
					De 1 a 4 hab por ha	Bajo	0.25		
					Menor a 1 hab por ha	Muy bajo	0.00		
	Dispersión poblacional	Se consideran localidades pequeñas a las menores de 2,500 habitantes. Con lo cual se calcula el porcentaje de personas con respecto al total de la población de un territorio determinado.	La dispersión poblacional se manifiesta principalmente en localidades pequeñas cuyas condiciones de escasez y rezago en la disponibilidad de servicios públicos representan un problema. Estas localidades presentan las mayores tasas de fecundidad, mortalidad infantil y ausencia o deficiencia de servicios básicos: agua, drenaje, electricidad, telefonía y caminos de acceso.	Dispersión poblacional = Total de la población que habita en localidades menores a 2500 habitantes / Población total	40 o más	Muy Alto	1.00	0.29	0.00
					De 30 a 39.9	Alto	0.75		
					De 20 a 29.9	Medio	0.50		
					De 10 a 19.9	Bajo	0.25		
					De 0 a 9.9	Muy bajo	0.00		
							Promedio del indicador población	**0.00**	

Fuente: Elaboración propia

Figura 277. Porcentaje de la población de habla indígena para la ciudad de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD POBLACIÓN DE HABLA INDÍGENA - CIUDAD DE TULUM

TULUM
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Escala: 1 : 28,000

0 500 1,000 1,500 m

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

SIMBOLOGÍA

Límites
- Área Geoestadística Básica

Curvas de nivel
- 10 metros
- 20 metros

Hidrografía
- Cuerpo de agua

Vías de comunicación
- Carretera federal
- Carretera estatal
- Calles

Zona Arqueológica
- Tulum

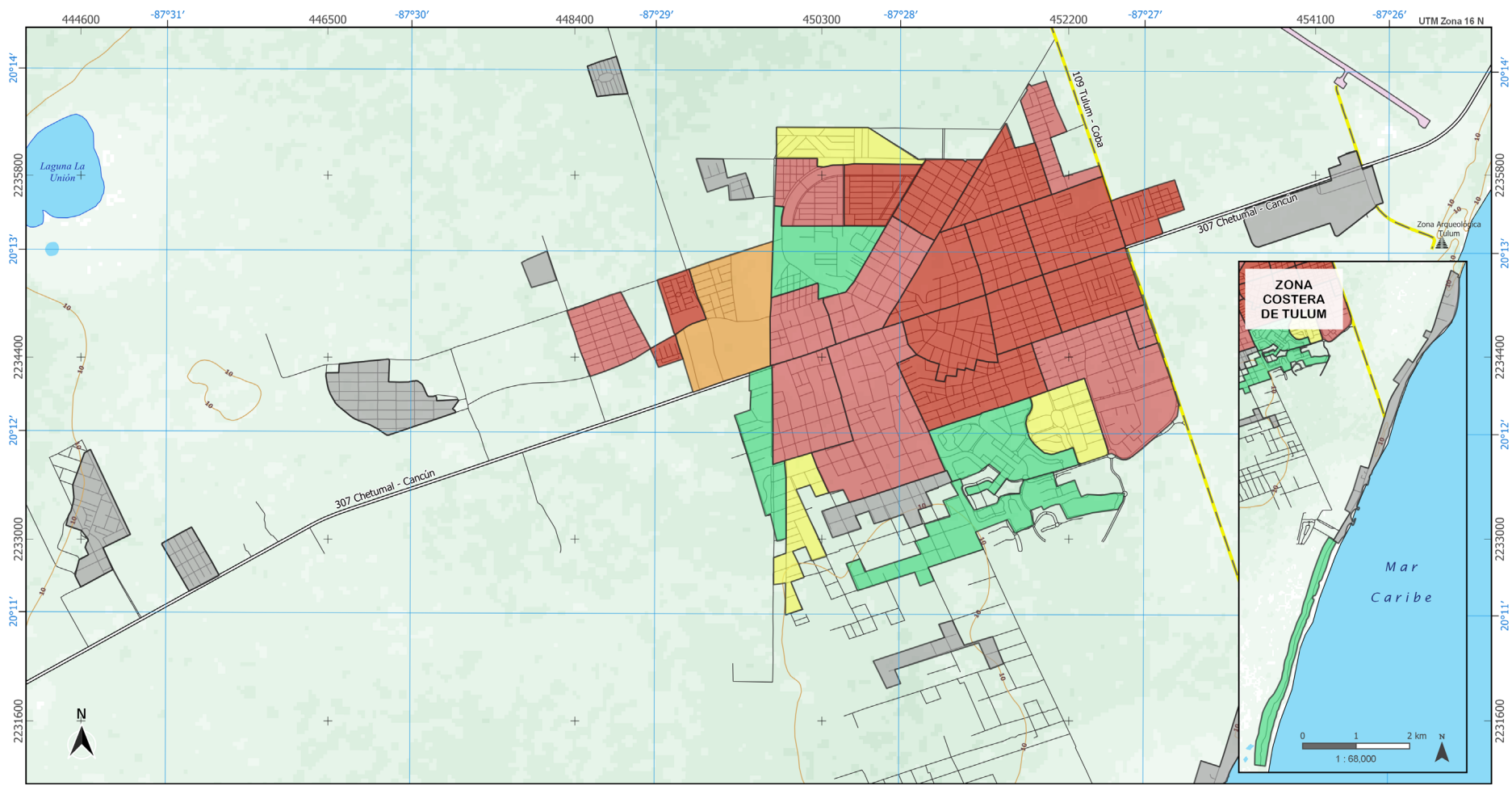
Grado de vulnerabilidad
- Predominantemente no indígena
- Sin dato

LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TULUM EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente: Elaboración propia

Figura 278. Densidad de población para la ciudad de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD DENSIDAD DE VULNERABILIDAD - CIUDAD DE TULUM

TULUM
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información

Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Escala: 1 : 28,000

0 500 1,000 1,500 m

Fuente:

Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

SIMBOLOGÍA

Límites
- Área Geoestadística Básica

Curvas de nivel
- 10 metros
- 20 metros

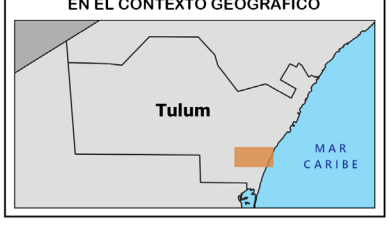
Hidrografía
- Cuerpo de agua

Vías de comunicación
- Carretera federal
- Carretera estatal
- Calles

Zona Arqueológica
- Tulum

Grado de vulnerabilidad
- Muy alta
- Alta
- Media
- Baja
- Muy baja
- Sin dato

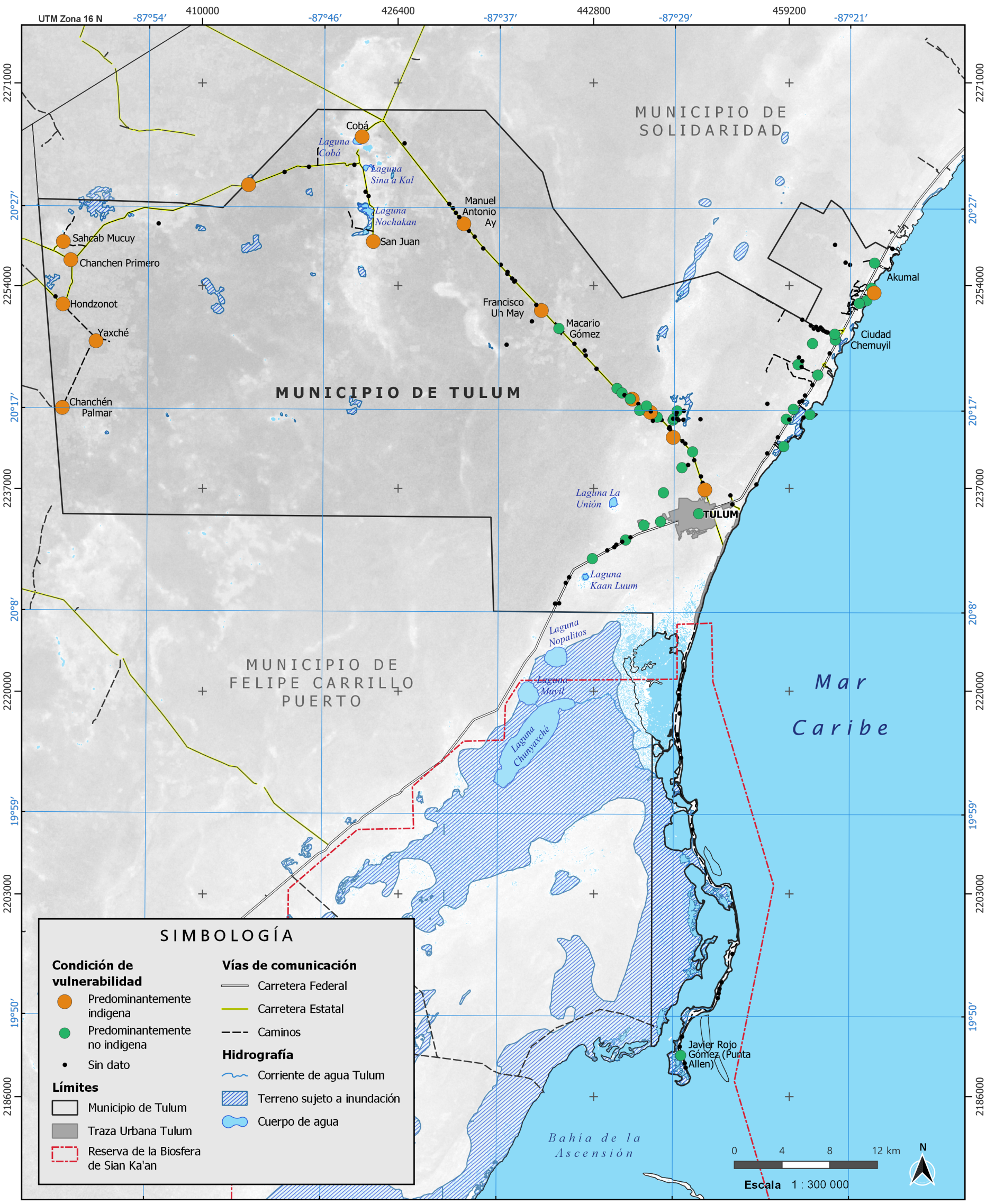
LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TULUM EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO



Fecha de elaboración: diciembre 2022

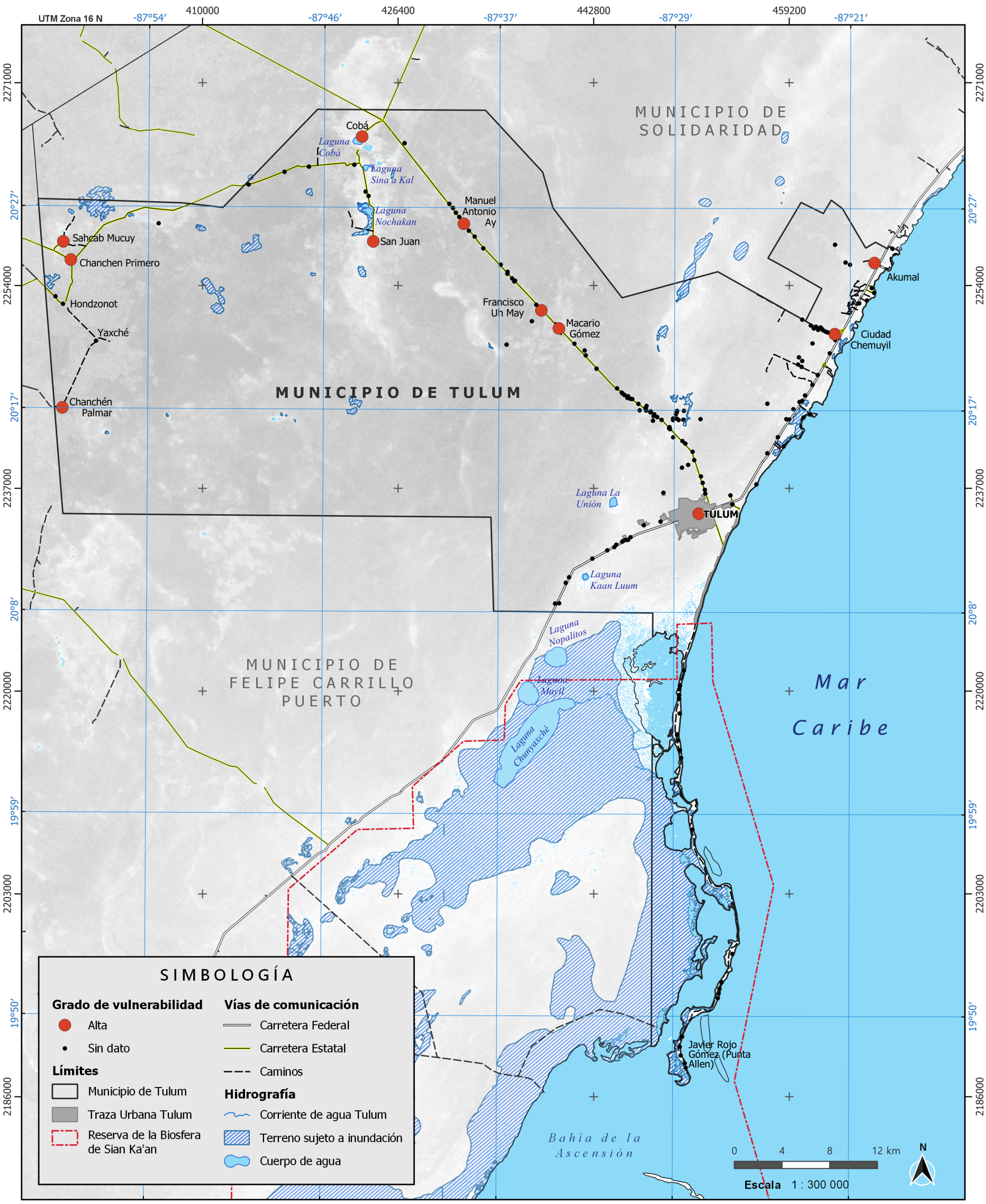
Fuente: Elaboración propia

Figura 279. Porcentaje de la población de habla indígena para el municipio de Tulum.

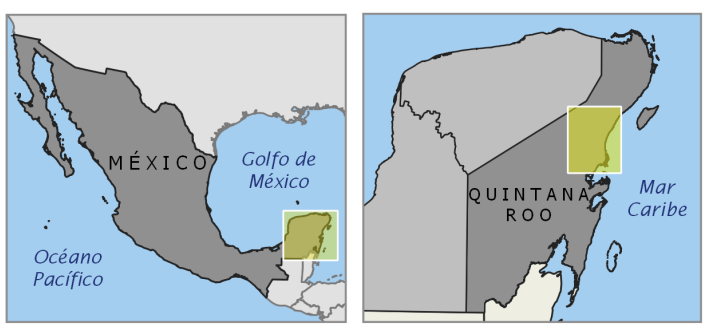


Fuente: Elaboración propia

Figura 280. Densidad de población para el municipio de Tulum.



MAPA DE VULNERABILIDAD - DENSIDAD DE POBLACIÓN



ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información técnica:
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Elaborado por: CIG Centro de Información Geográfica

Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente:
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales, INEGI.

Fuente: Elaboración propia

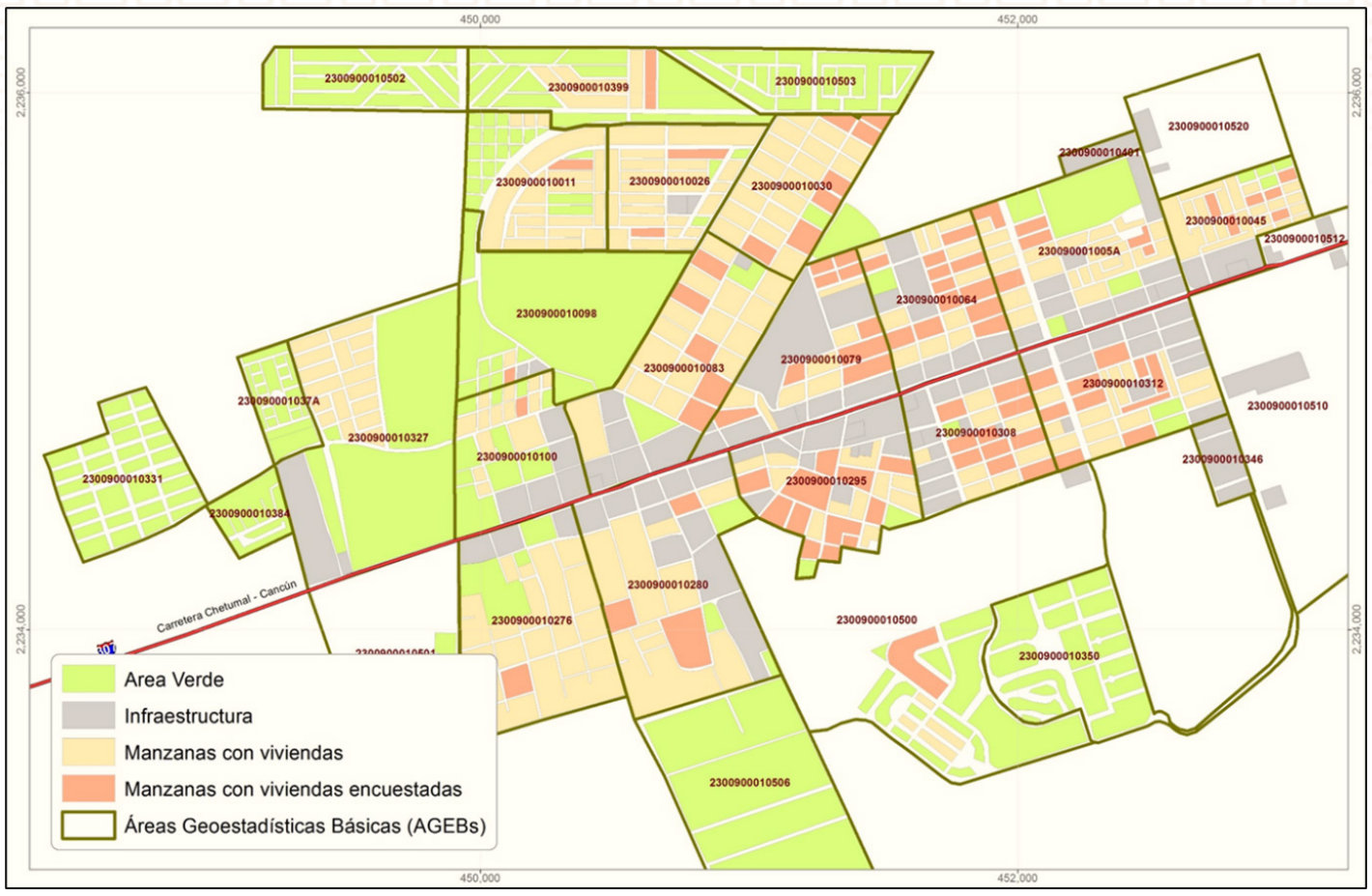
6.1.1.2. Percepción social

Ciudad de Tulum

Con base a los resultados de la encuesta aplicada en 2017 a través del proyecto “Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres asociados a huracanes: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen” (Castillo, 2017) en la ciudad de Tulum, se muestran los resultados de la vulnerabilidad por colonia para esta localidad.

El marco muestral para la ciudad de Tulum se constituyó de 38 AGEBs (Áreas Geoestadísticas Básicas, INEGI) y 690 manzanas. Se eligieron las manzanas que contaban con viviendas (figura 218).

Figura 281. Marco muestral ciudad de Tulum



Fuente: Proyecto “Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres asociados a huracanes: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen” (Castillo, 2017).

El *diseño de la muestra* se realizó a través de un muestreo estratificado bi-etápico:

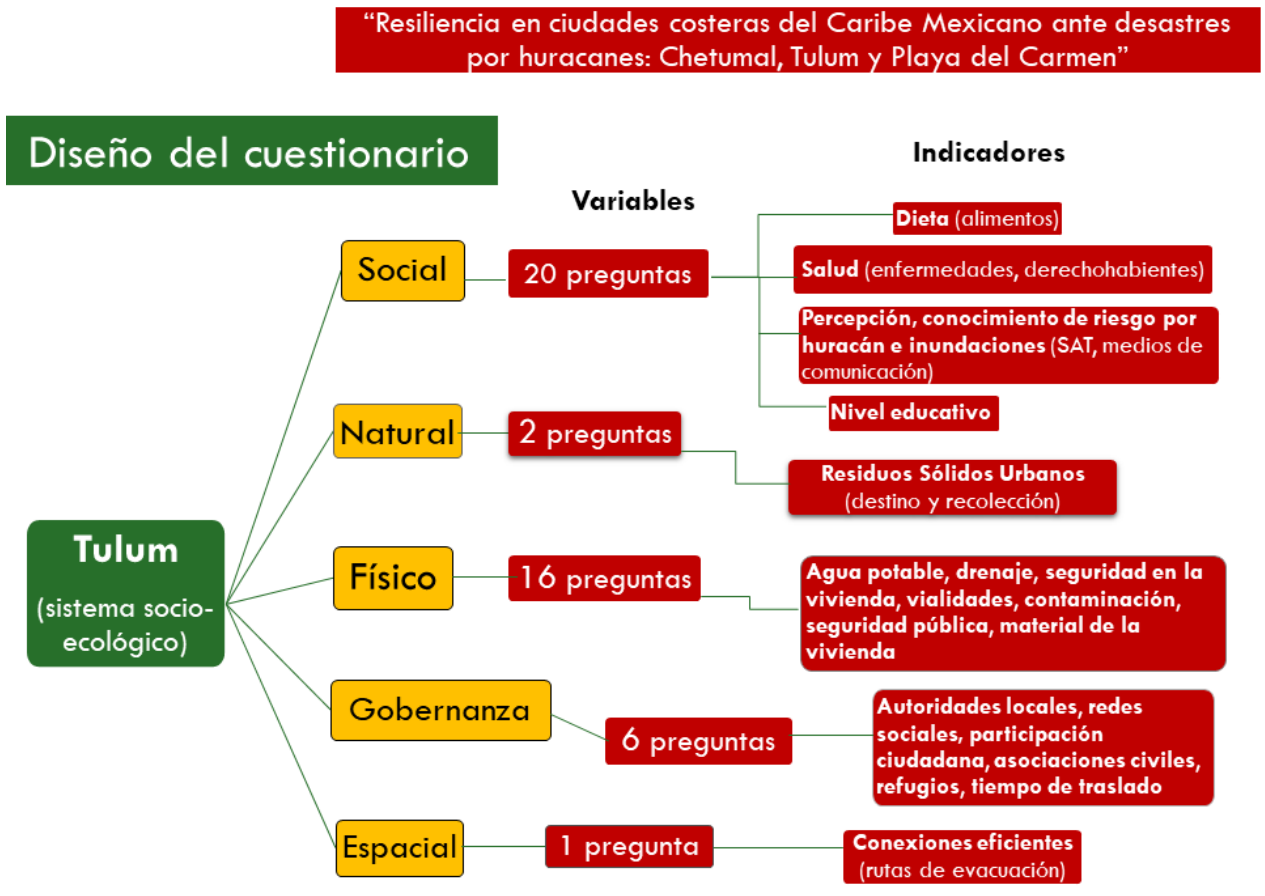
- Muestreo aleatorio simple de manzanas en cada AGEB.
- Muestra sistemática de dos viviendas en cada manzana seleccionada.

A partir de lo anterior se obtuvo un tamaño de muestra de 178 viviendas, correspondientes a 89 manzanas que equivalen a un 3.5% de las viviendas totales de la ciudad de Tulum para ese periodo.

El diseño del cuestionario tenía como objetivo principal: *conocer la preparación y respuesta de la población con respecto a fenómenos como los huracanes y lluvias intensas*. Para la conformación de las preguntas se realizó revisión de bibliografía como son instrumentos, metodologías y artículos científicos y de organizaciones internacionales, nacionales, estatales y locales.

Posteriormente, se realizó la identivficación de variables que conformarían el cuestionario, el cual se integró por 52 preguntas (figura 282). Este fue estructurado en 6 secciones la primera correspondió a datos generales del entrevistado las 5 secciones restantes fueron conformadas por el sistema social, sistema natural, sistema físico, sistema de gobernanza y sistema espacial. El enfoque sistémico, tal como lo señala el Marco de Sendei, actualmente es base para conocer la percepción de la población en el contexto de la Gestión de Riesgo de Desastres (GRD).

Figura 282. Diseño del cuestionario

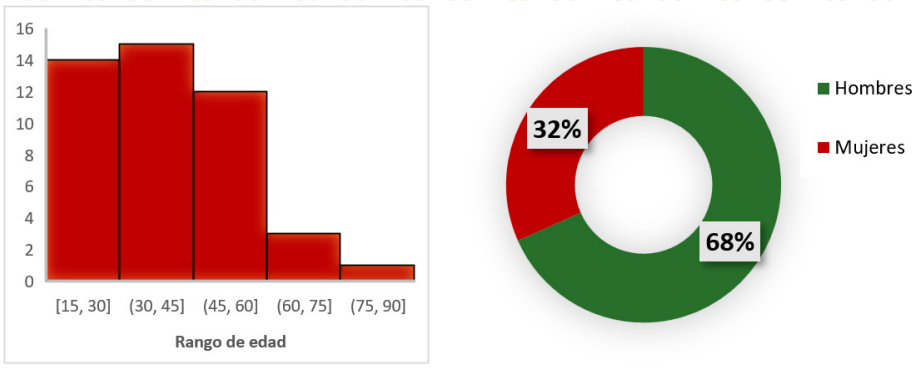


Fuente: Proyecto “Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres asociados a huracanes: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen” (Castillo, 2017).

Resultados

Como se ha mencionado la primera sección del cuestionario correspondió a los datos del entrevistado. Contabilizando las respuestas de la sección "Ambiente cultural ante inundaciones y huracanes" se obtuvo el grado de exposición de la ciudad de Tulum que fue de 0.76. A continuación, en las gráficas siguientes se exponen los principales resultados:

Figura 283. Gráfica de Edad del entrevistado y sexo jefe de familia



El rango de edad del entrevistado con mayor participación fue entre 30 a 45 años y la mayoría tenía como cabeza de familia un hombre (68%), ver figura 283.

Percepción de la población:

¿Podría mencionar si ha escuchado o entiende qué significa la palabra riesgo?

El 89.44% respondió que si ha escuchado o entiende lo que significa "RIESGO", sin embargo, aún la población confunde RIESGO = PELIGRO, también lo perciben como "daño", "algo malo", "peligroso", "estar en peligro", entre otros (figura 284).

El significado del concepto de **RIESGO** de acuerdo con Hernández et al. (2018) se define como la ocurrencia potencial de las consecuencias dañinas o pérdidas resultantes de las interacciones entre los peligros naturales o antropogénicos y las condiciones vulnerables.

Figura 284. ¿Qué entiende por riesgo la población de la ciudad de Tulum?



¿Podría mencionar si ha escuchado o entiende qué significa la palabra vulnerabilidad?

El 48.89% respondió que si ha escuchado o entiende lo que significa "VULNERABILIDAD", lo cual lo perciben como "débil", "debilidad", "fragilidad", "estar en peligro", entre otros (figura 285). Todavía no se tiene una idea clara de su significado.

El significado del concepto de **VULNERABILIDAD** de acuerdo con Hernández et al. (2018) citando a Blaikie et al. (2006) se define como las características de una persona o grupo de personas relacionadas con la capacidad de anticipar, hacer frente, resistir y recuperarse del impacto de los peligros naturales. También se asume como una predisposición intrínseca a ser afectado o susceptible a sufrir daños físicos, económicos, sociales o políticos, como consecuencia de un evento de origen natural o antropogénico.

Figura 285. ¿Qué entiende por vulnerabilidad la población de la ciudad de Tulum?



¿Podría mencionar si ha escuchado o entiende qué significa la palabra resiliencia?

El porcentaje de la población que entiende o ha escuchado el concepto de resiliencia, fue mínimo, solamente el 6.11% respondió que si ha escuchado o entiende lo que significa "RESILIENCIA". La percepción de la población fue que "nunca" había escuchado el concepto y fueron pocas las respuestas, sin embargo, se obtuvo una respuesta adecuada "capacidad de sobreponerse de los riesgos" (figura 286).

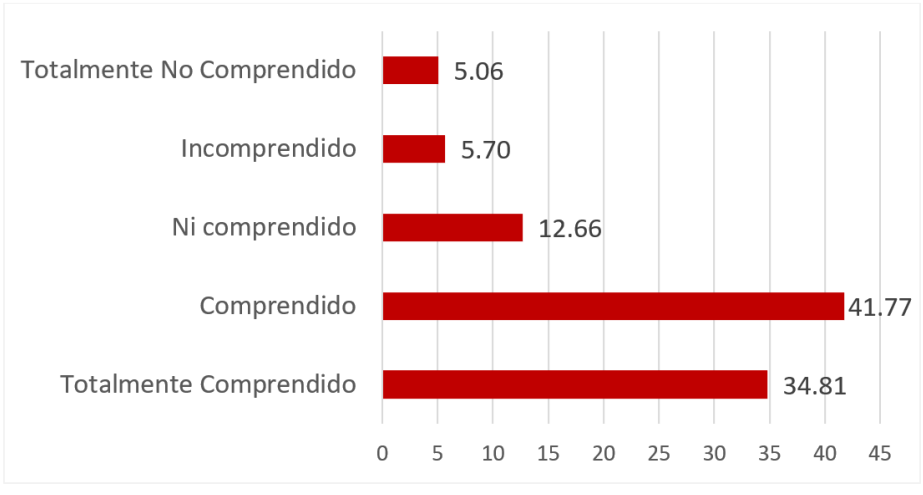
El concepto de **RESILIENCIA**, de acuerdo con ONU-HABITAT (2018), "describe la habilidad de cualquier sistema urbano de mantener continuidad después de impactos o de catástrofes mientras contribuye positivamente a la adaptación y la transformación".

Figura 286. ¿Qué entiende por vulnerabilidad la población de la ciudad de Tulum?



¿En qué grado comprende el significado de las palabras riesgo ante huracanes e inundaciones?

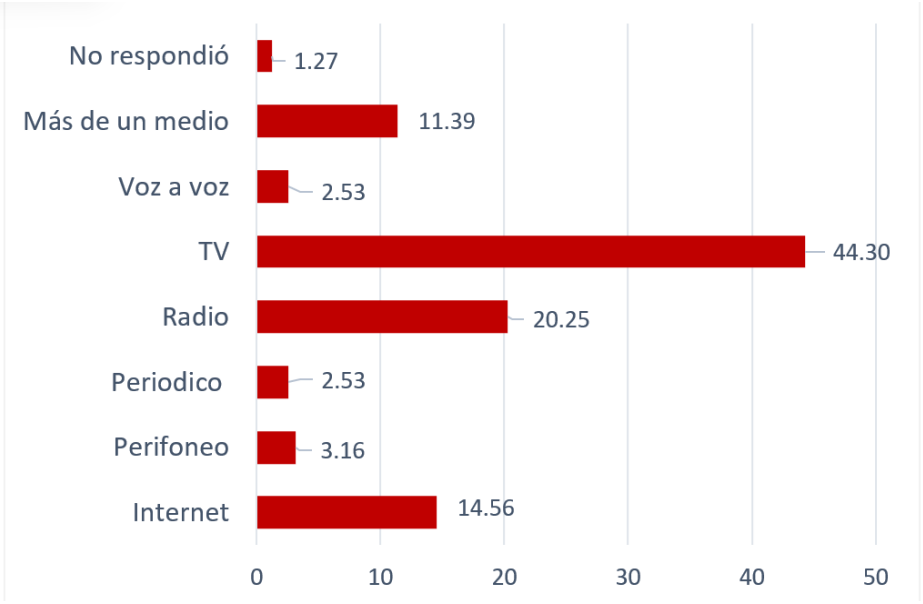
Figura 287. Gráfica del Significado de la palabra riesgo ante amenazas de huracanes e inundaciones



La mayor parte de la población comprende el riesgo ante las amenazas de huracanes e inundaciones (41.77%) y casi un 35% lo comprende totalmente (figura 287).

¿Por qué medio se entera que hay alerta de huracán?

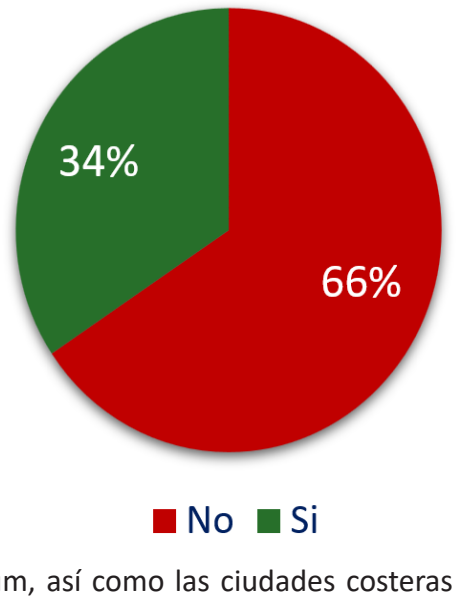
Figura 288. Gráfica de Medio de comunicación para alerta de huracán



La población de la ciudad de Tulum señala que el medio de comunicación por el cual se entera de la alerta de huracán principalmente es la televisión (44.30%), seguido del radio (20.25%) y en tercer lugar por internet (14.56%), ver figura 288.

¿Ha vivido alguna experiencia de inundación o huracán?

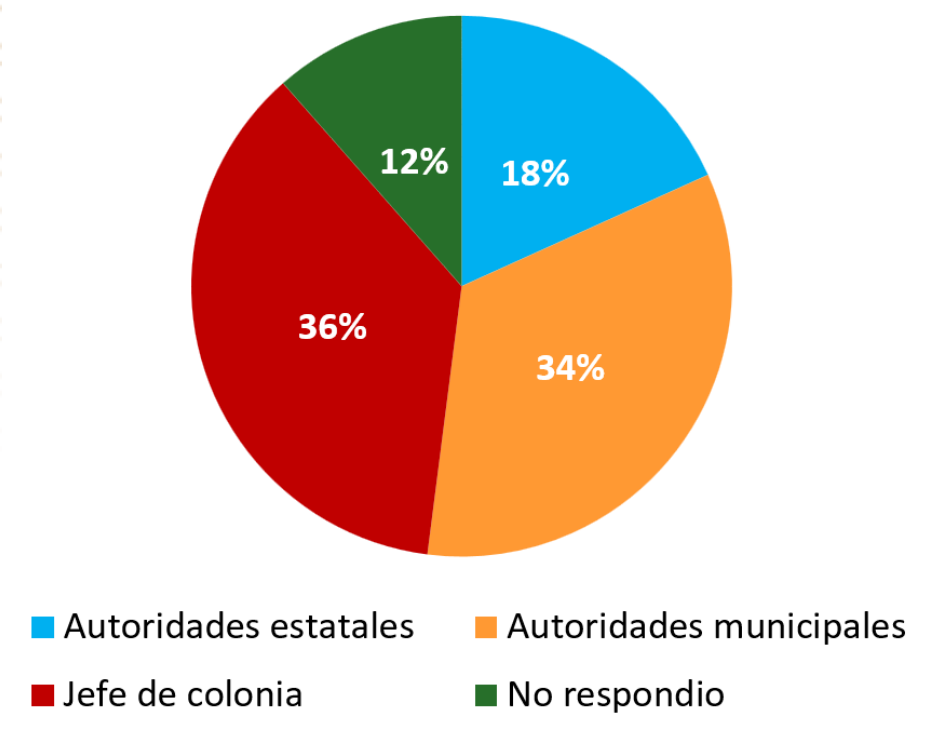
Figura 289. Gráfica de Experiencia de inundación y/o huracán



La ciudad de Tulum, así como las ciudades costeras de Quintana Roo, persistentemente han sido y serán amenazadas por huracanes o ciclones tropicales, siendo así que el 66% de población tuvo una respuesta afirmativa (figura 289).

¿Para mejorar los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) con cuál autoridad se debe tener más contacto?

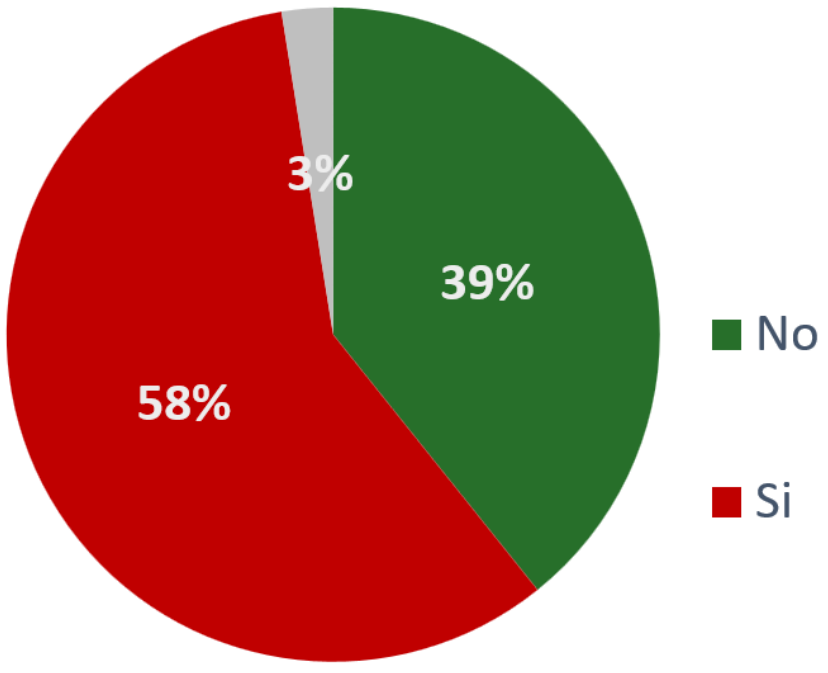
Figura 290. Gráfica de Mejoramiento de los SAT



La población de la ciudad de Tulum comenta que la autoridad más cercana para comentar el mejoramiento de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) sería el jefe de colonia (36%), seguido de las autoridades municipales (34%) y finalmente las estatales (figura 290).

¿Podría indicarme si considera que está en riesgo por huracanes o inundaciones en su colonia?

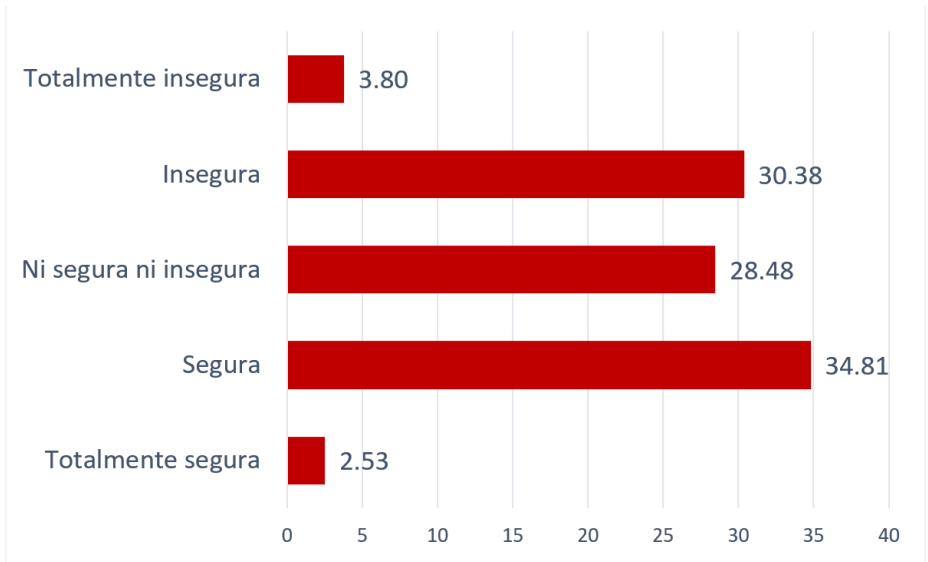
Figura 291. Gráfica - Se considera en riesgo



El 58% de la población de la ciudad de Tulum considera que se encuentra en riesgo de inundación y de afectaciones en caso de que un huracán impacte la ciudad (figura 291).

¿Qué nivel de seguridad posee esta vivienda, frente a emergencia por huracanes o inundaciones?

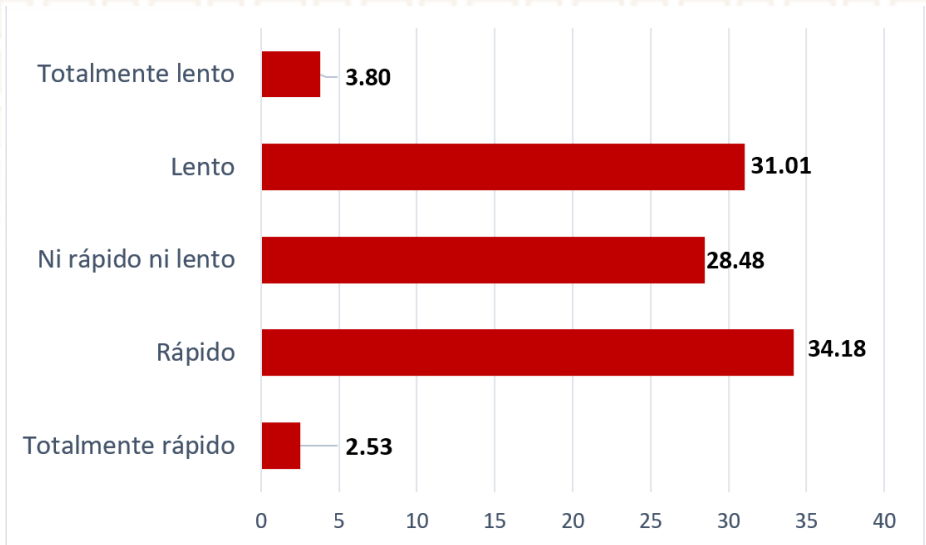
Figura 292. Gráfica de Nivel de seguridad de la vivienda



La mayor parte de la población (34.81%) de la ciudad de Tulum piensa que su vivienda se encuentra segura frente a una emergencia de huracán, en contraparte, el 30.38% presupone que se encuentra insegura (figura 292).

En caso de evacuación por emergencia de huracán o inundación ¿Qué tan rápido sería el desplazamiento en las vialidades de la colonia, hacia zonas seguras?

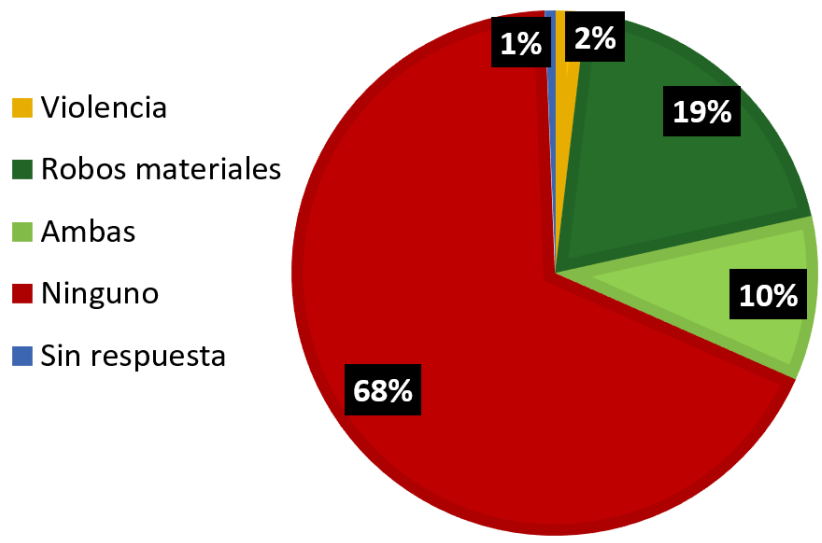
Figura 293. Gráfica de Desplazamiento en vialidades a zonas seguras



Los habitantes de la ciudad de Tulum asumen que en caso de evacuación el desplazamiento por las vialidades de su cuadra hacia áreas más seguras sería ágil (34.18%), lento (31.01%) y ni rápido ni lento (28.48%), ver figura 293.

¿Qué tipo de afectaciones a su persona, familia y bienes materiales ha experimentado debido al paso de un huracán?

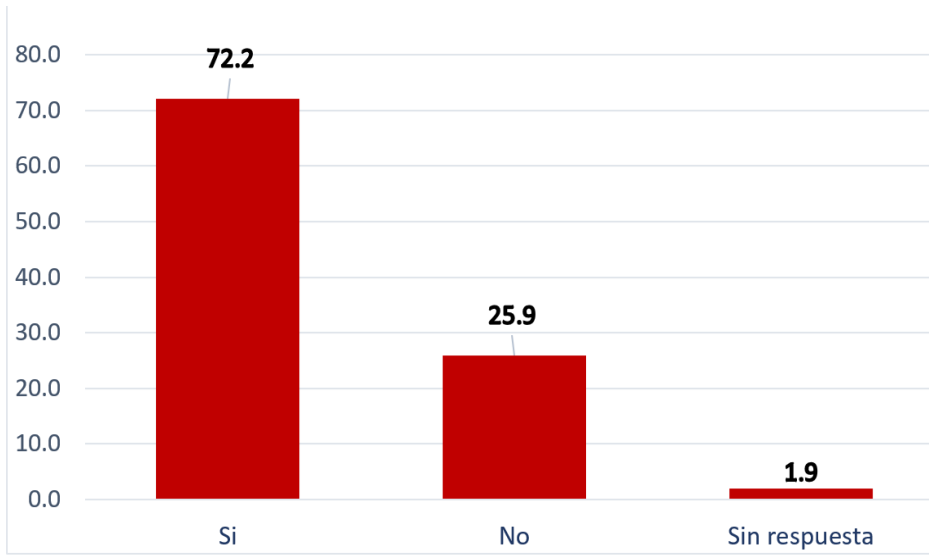
Figura 294. Gráfica de Afectaciones por el paso de un huracán



La mayor afectación que ha experimentado los habitantes de la ciudad de Tulum con el paso de los huracanes ha sido mínimo, la mayoría expreso que no ha tenido ninguno (68%). Entre los que si señalaron que tuvieron afectaciones se encuentran: robos materiales con un 19%, violencia con un 2% y ambas un 10% (figura 294).

¿Sabe qué hacer en caso de un huracán o inundación?

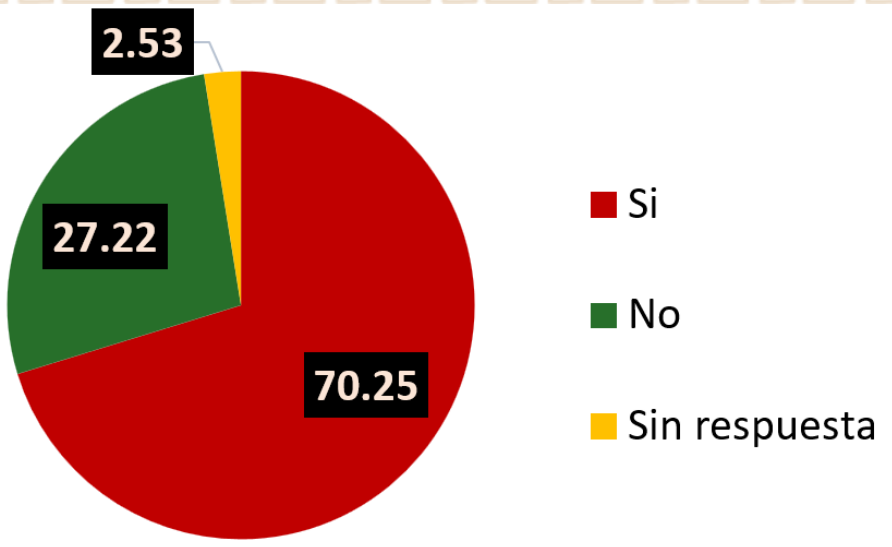
Figura 295. Gráfica de Acciones ante un huracán y/o inundación



El 72.2 % de la población que reside en la ciudad de Tulum sabe que acciones tomar en caso de un impacto de huracán o de una inundación, solo un 25.9% no (figura 295). Entre las iniciativas que tomarían se encuentran: “retirarme de la ciudad”, “ir a casa de un familiar o amistad”, “desplazarme a un refugio”, “quedarme en mi vivienda y atender las indicaciones de las autoridades”, “preguntar a un vecino”, entre otras.

¿Conoce algún refugio cercano a su vivienda?

Figura 296. Gráfica de Conocimiento de la localización de refugios



El 70.25% de los habitantes de la ciudad de Tulum señalaron que SI conocen donde se encuentran los refugios cercanos a su vivienda, solo un 27.22% señaló que NO (figura 296).

Localidades del municipio de Tulum

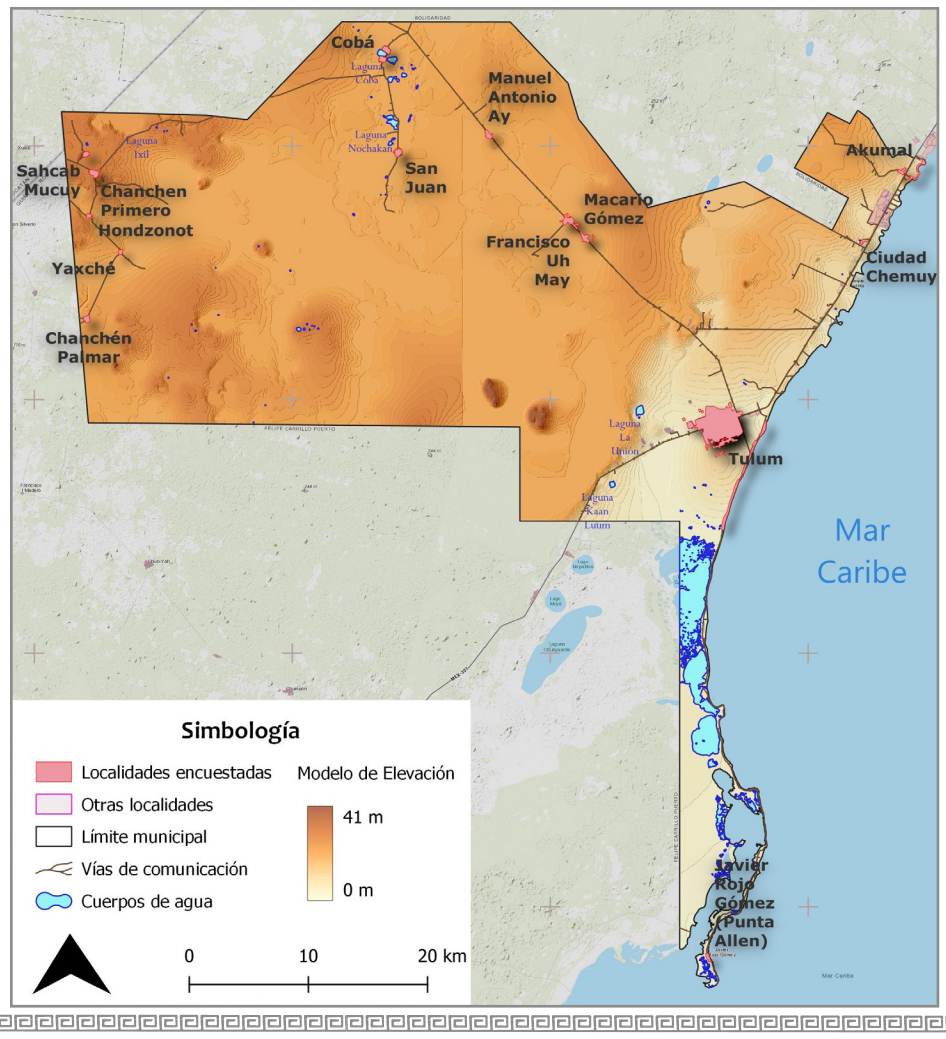
Del total de localidades del municipio de Tulum se tomó una muestra representativa con las localidades con mayor población y más significativas del territorio para levantar la encuesta de percepción. Se levantaron 516 encuestas en zona rural y 180 en zona urbana, dando un total de 696. La distribución de la encuesta por localidad se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 121. Localidades muestreadas

Localidad	Manzanas	Tamaño de muestra*
Akumal	36	72
Chanchén Palmar	26	52
Chanchén Primero	35	70
Chemuyil	14	28
Cobá	15	30
Francisco Uh May	15	30
Hondzonot	15	30
Macario Gómez	15	30
Manuel Antonio Ay	14	28
Punta Allen	25	46
Sahcab Mucuy	22	44
San Juan	15	30
Yaxché	13	26
Total general	**260**	**516**
Nota: * Al 85% de confianza y margen de error del 15%		

Como se puede observar en la figura 297 se cubrió un 30% de las localidades totales del municipio, la parte norte, sur, oeste y este, se eligió visitar a las más importantes y representativas, las restantes son pequeños ranchos o localidades rurales de menos de 50 habitantes.

Figura 297. Distribución de localidades encuestadas.



El instrumento utilizado fue un cuestionario para levantar la información de la población de las localidades del municipio de Tulum. El objetivo principal fue conocer el grado de vulnerabilidad y la percepción del riesgo del imaginario colectivo que tienen acerca de las amenazas de origen natural que existen en su comunidad y de su grado de exposición frente a las mismas (figura 298). La valoración de las respuestas se califica de 0 a 1, donde cero es alto y 1 bajo.

Figura 298. Cuestionario de percepción del riesgo del imaginario colectivo

TULUM — UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO — CIG Centro de Información Geográfica — *Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum 2022*

Cuestionario a la percepción de riesgo del imaginario colectivo que tiene la población acerca de las susceptibilidades que existen en su comunidad y de su grado de exposición frente a las mismas.

Núm.	Pregunta		
1	**¿Dentro de los tipos de peligro que existen cuántos tipos de fuentes de peligro identifica en su localidad?**		
	A. De 1 a 5 (1)	B. De 6 a 13 (0.5)	C. 14 o más (0)
2	**Respecto a los peligros mencionados en la pregunta no. 1, ¿recuerda o sabe si ha habido emergencias asociadas a estas amenazas en los últimos años?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
3	**¿Considera que un fenómeno natural se pude convertir en desastre?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
4	**¿Considera que su vivienda está localizada en un área susceptible de amenazas (que se encuentre en una ladera, en una zona sísmica, en una zona inundable, etc.)?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
5	**¿Ha sufrido la pérdida de algún bien a causa de un desastre natural?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
6	**En caso de que recuerde algún desastre, los daños que se presentaron en su comunidad fueron:**		
	A. Ninguna fatalidad, daños leves a viviendas e infraestructura (bajo) (0.25)	B. Personas fallecidas, algunas viviendas con daño total y daños a infraestructura (medio) (0.5)	C. Personas fallecidas, daño total en muchas viviendas y daños graves en infraestructura. (alto) (1)
7	**¿Alguna vez ha quedado aislada su comunidad a causa de la interrupción de vías de comunicación, por algunas horas, debido a algún tipo de fenómeno?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
8	**¿Cree que en su comunidad se identifican los peligros?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
9	**¿Conoce algún programa, obra o institución que ayuda a disminuir efectos de fenómenos naturales (construcción de bordos, presas, terrazas, sistema de drenaje, sistema de alertamientos, etc.)?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
10	**¿En los centros educativos de su localidad o municipio se enseñan temas a cerca de las consecuencias que trae consigo un fenómeno natural?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
11	**¿Alguna vez en su comunidad se han llevado a cabo campañas de información acerca de los peligros existentes?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
12	**En caso de haberse llevado campañas de información, ¿cómo se enteró?**		

1

TULUM — UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO — CIG Centro de Información Geográfica — *Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum 2022*

	A. No se enteró/no ha habido campañas (1)	B. A través de medios impresos (0.5)	C. A través de radio y TV (0)
13	**¿Ha participado en algún simulacro en alguna ocasión?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
14	**¿Sabe a quién o a dónde acudir en caso de una emergencia?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	
15	**¿Sabe si existe en su comunidad un sistema de alertamiento para dar aviso a la población sobre alguna emergencia?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	
16	**En caso de haber sido afectado a causa de un fenómeno natural, ¿se le brindó algún tipo de apoyo?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
17	**¿Ha sido evacuado a causa de un fenómeno natural (inundación, sismo, huracán)?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
18	**De acuerdo con experiencias anteriores, ¿considera que su comunidad está lista para afrontar una situación de desastre tomando en cuenta las labores de prevención?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
19	**¿Existe en su comunidad /localidad/municipio alguna organización que trabaje en la atención de desastre?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
20	**¿Conoce la existencia de la Unidad de Protección Civil?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
21	**¿Sabe dónde está ubicada y qué función desempeña la Unidad de Protección Civil?**		
	A. Sé dónde se encuentra y sé sus funciones (0)	B. No sé dónde se encuentra y no sé qué hace (1)	C. Sé qué hace pero no sé dónde se encuentra (0.5)
22	**¿Estaría preparado para enfrentar otro desastre como el que enfrentó?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
23	**¿Considera que su comunidad puede afrontar una situación de desastre y tiene la información necesaria?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	C. NO SE (1)
24	**¿Qué tanto puede ayudar la Unidad de Protección Civil?, ¿Puede afrontar una situación de desastre y tiene la información necesaria?**		
	A. MUCHO (0)	B. NADA (1)	C. POCO (0.5)
25	**¿Si usted tuviera la certeza de que su vivienda se encuentra en peligro estaría dispuesto a reubicarse?**		
	A. SI (0)	B. NO (1)	

2

Para que los entrevistados puedan identificar las fuentes de peligros a causa de fenómenos perturbadores (pregunta 1) se les presentó la tabla 122 donde se establecen los riesgos de tipo geológico e hidrometeorológico y sus amenazas.

Tabla 122. Fenómenos perturbadores

TIPO	FENÓMENO
Geológico	1. Vulcanismos
	2. Sismos
	3. Tsunamis
	4. Inestabilidad de laderas
	5. Flujos
	6. Caídos o derrumbes
	7. Hundimientos
	8. Subsidencia
	9. Agrietamientos
Hidrometeorológico	10. Ondas cálidas y gélidas
	11. Sequias
	12. Heladas
	13. Tormentas de granizo
	14. Tormentas de nieve
	15. Ciclones tropicales
	16. Tornados
	17. Tormentas de polvo
	18. Tormentas eléctricas 19. Lluvias extremas
	20. Inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres

Fenómenos perturbadores de acuerdo con la Ley General de Protección Civil (Art. 2 Fracc. XXII-XXIII/ DOF 06-06-2012

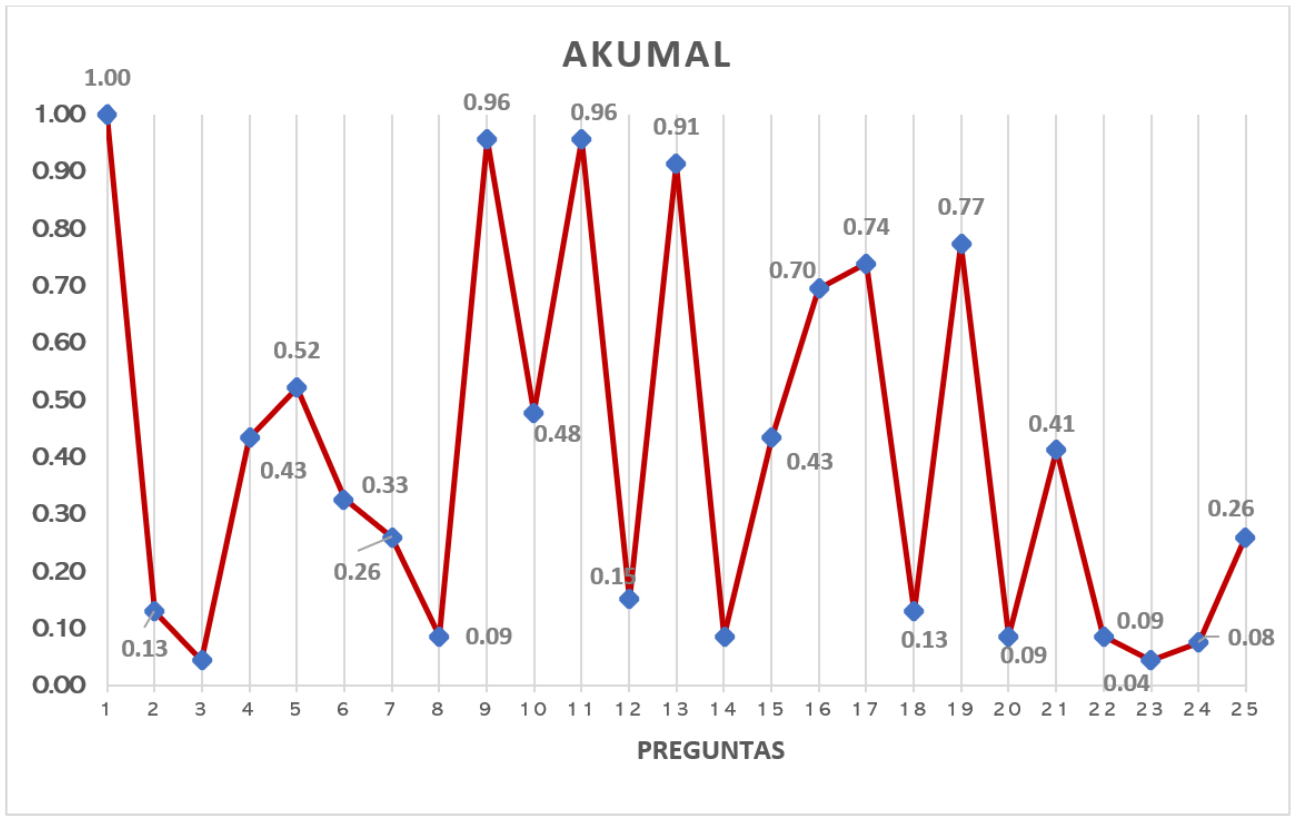
A continuación, se muestran los resultados de percepción del riesgo para las 13 localidades visitadas.

Akumal

Esta localidad se sitúa al norte del municipio (figura 300). Akumal del maya: Akumal significa "Lugar de tortugas". Se localiza a unos 27.5 kilómetros de la ciudad de Tulum. Su población es alrededor de 2,154 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). Es la localidad con mayor población del municipio después de la ciudad de Tulum, sin embargo, por el tamaño de población aún se considera rural, debe sobrepasar los 2,500 habitantes para, de acuerdo con los criterios del INEGI, se considere urbana (figura 301). El origen de su población proviene de otros Estados del país, gente de ascendencia maya y extranjeros.

Entre las respuestas obtenidas de sus pobladores destacan las siguientes (figura 302): solo identifican hasta 5 tipos de amenazas para su localidad (pregunta 1); no conocen medidas de protección para disminuir algunos de los efectos de fenómenos naturales (pregunta 9); no se han llevado campañas de información para los peligros existentes para la comunidad (pregunta 11); no han participado en simulacros (figura 299). En donde se distinguen mejor fue en que opinan que la comunidad puede afrontar un desastre (pregunta 23); que la unidad de protección civil puede ayudar mucho para afrontar un desastre (pregunta 24) y que si conocen la existencia de una unidad de protección civil (pregunta 20). El grado de exposición de la localidad fue de 0.40.

Figura 299. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Akumal



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo "Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023".

Figura 300. Localidad de Akumal vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 301. Localidad de Akumal.





Fuente: Trabajo de campo.

Figura 302. Levantamiento de encuesta Akumal.

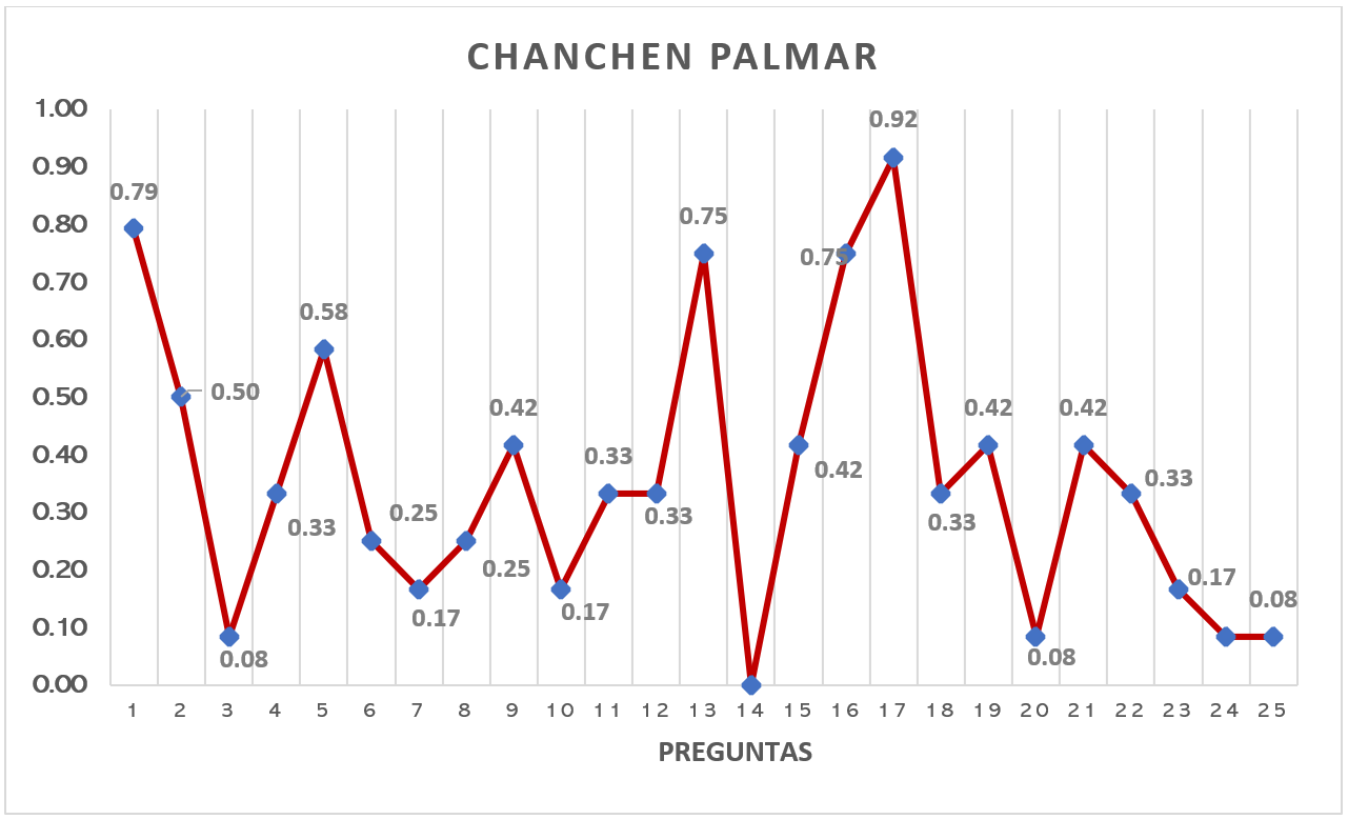


Fuente: Trabajo de campo.

Chanchén Palmar

En la localidad de Chanchén Palmar se ubica en la parte Oeste del municipio, muy cercana al Estado de Yucatán (figura 297). Esta comunidad rural cuenta con 507 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). En la siguiente figura 303 se muestran los principales resultados obtenidos del levantamiento de datos en campo. Entre lo que se destaca que la población no ha tenido que ser evacuada (pregunta 17), los habitantes solo identifican entre 1 a 5 peligros (pregunta 1), no han participado en simulacros (pregunta 13), el apoyo brindado por alguna afectación no ha sido completo o no han tenido (pregunta 16). Las preguntas restantes obtuvieron calificaciones menos significativas para esta localidad. El grado de exposición de la comunidad fue de 0.36.

Figura 303. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Chanchén Palmar



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 304. Localidad de Chanchén Palmar vista aérea.



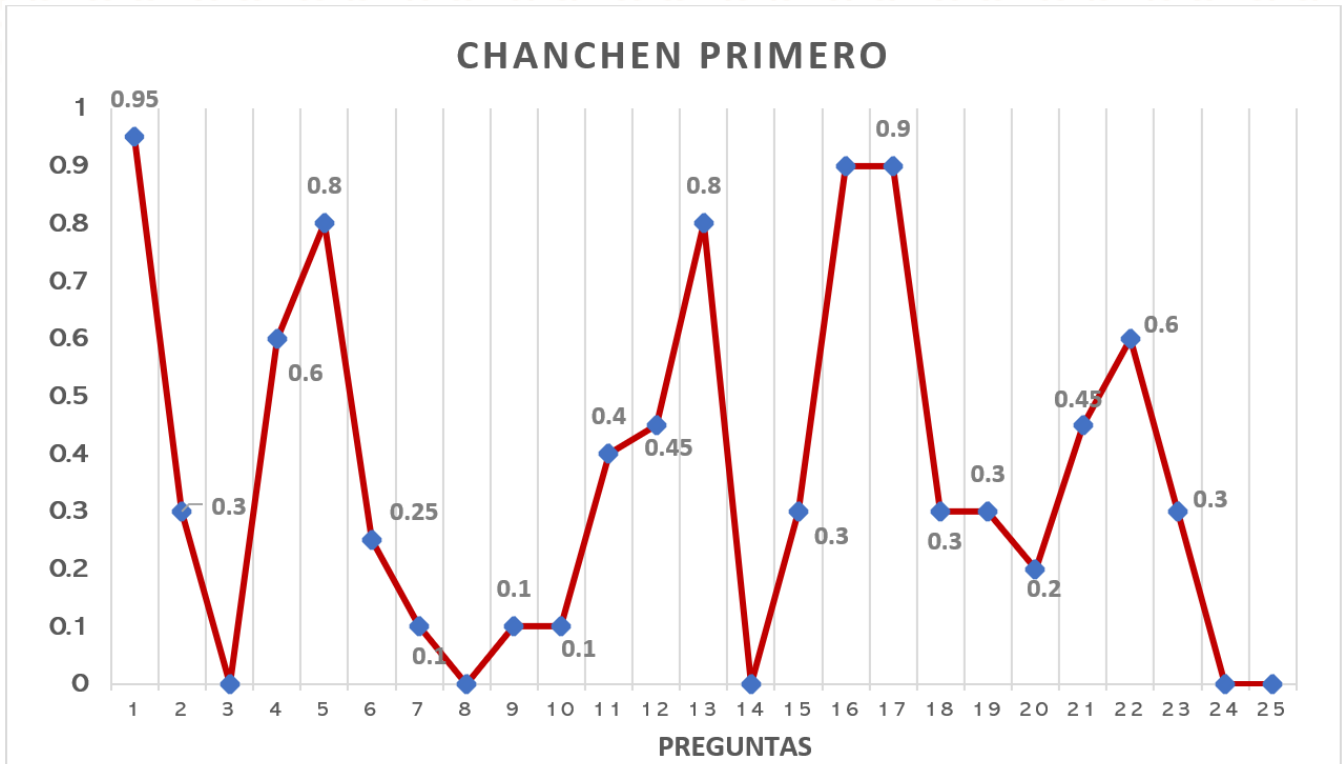
Fuente: Trabajo de campo.

Chanchén Primero

Es la localidad de Chanchén Primero, con mayor población de las ubicadas en la parte Oeste del municipio, forma parte de la llamada “zona maya” del municipio, también cercana al Estado de Yucatán (figura 297). Su vialidad principal se encuentra pavimentada, aunque han faltan tramos, se encuentra aproximadamente a 76 kilómetros de la ciudad de Tulum. Esta comunidad rural cuenta con 1,078 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). En la siguiente gráfica 15 se muestran los resultados obtenidos de la percepción de la población del riesgo (figura 305).

En primer lugar, tenemos que sus habitantes solo identifican menos de 5 fenómenos perturbadores para su localidad, su perdida en bienes ha sido mínima (pregunta 5); siguiendo con que no han participado en ningún simulacro (pregunta 13); no se les brinda apoyo en caso de ser afectados por algún fenómeno natural (pregunta 16); tampoco han sido evacuados (pregunta 17) y se siente poco preparados para enfrentar un desastre (pregunta 22). El grado de exposición de la localidad fue de 0.36.

Figura 305. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Chanchén Primero



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 306. Localidad de Chanchén Primero.



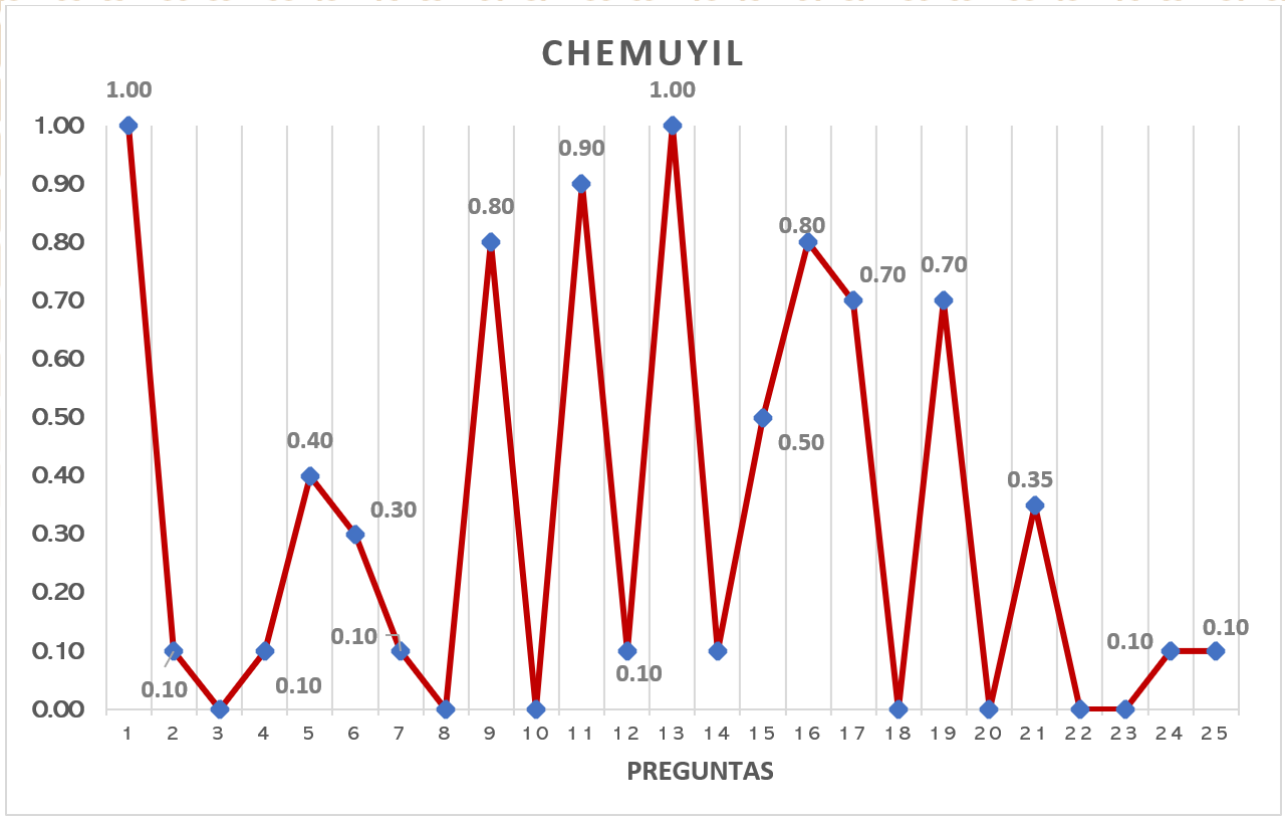
Fuente: Trabajo de campo. Entrevista con la delegada municipal de Chanchén Primero C. Cástula Ché Ciau

Chemuyil

La localidad de Ciudad Chemuyil cuenta con una población de 548 de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). Se localiza a unos 19.2 kilómetros hacia el Norte de la ciudad de Tulum (figura 297). Compuesta por población indígena maya y población procedente de fuera del Estado. Esta localidad de funda en la década de los noventa a partir de la construcción de casa de interés social por el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT). Se considera aún una localidad rural que cuenta con servicios básicos, infraestructura educativa y de salud básica. La mayor parte de su población se encuentra empleada en el sector turismo.

Entre las respuestas obtenidas se exponen las más significativas (figura 307): los habitantes de la comunidad solo pudieron identificar al menos 5 amenazas (pregunta 1); no han participado en simulacros (pregunta 13); no les han llevado campañas de información acerca de los peligros existentes (pregunta 11); no conocen ningún programa que ayude a disminuir efectos de fenómenos naturales, por ejemplo, como sistemas de drenaje y sistemas de alertamiento (pregunta 9). En contraste, si conocen que una amenaza natural puede llegar a convertirse en un desastre (pregunta 3); opinan que la localidad si identifican los peligros (pregunta 8); si se enseña en los centros educativos las consecuencias del impacto de una amenaza natural (pregunta 10) y consideran que la comunidad esta preparada para afrontar una situación de desastre (pregunta 23). El grado de exposición de la localidad fue de 0.33.

Figura 307. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Chemuyil



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 308. Localidad de Chemuyil vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo

Figura 309. Localidad de Chemuyil.





Fuente: Trabajo de campo.

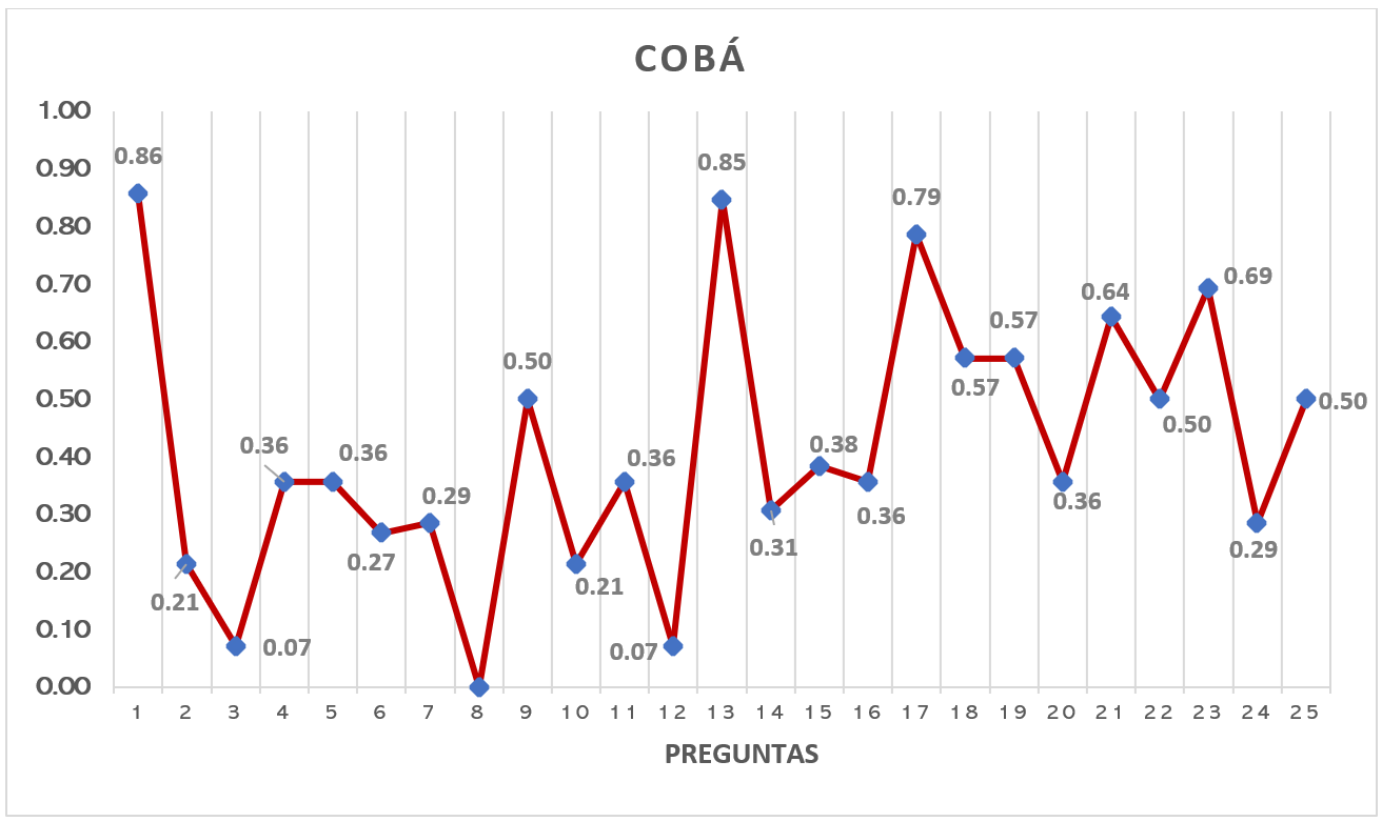
Cobá

La localidad de Cobá se localiza a 47 kilómetros aproximadamente de la ciudad de Tulum rumbo Oriente del municipio transitando por la carretera 109. Dentro de la localidad se encuentra la zona arqueológica de Cobá, considerada ciudad maya de gran poderío que tuvo su periodo de esplendor antes que surgiera Chichén Itzá, por lo cual, gran parte de su población es de origen maya. Cobá es un destino turístico muy importante ya que es un sitio arqueológico de importancia mundial, por lo que la mayor parte de su población se encuentra empleada en actividades del sector turístico o de servicios (figura 311).

Rodeada por diversos cuerpos de agua, lagos y lagunas, que en temporada de lluvias llegan a desbordarse, por lo que año tras año sufren por el problema de inundaciones debido a la planicie en donde se asienta. La laguna principal que lleva el mismo nombre de la localidad divide a la comunidad en zona norte, en su punto más alto, y zona sur que atraviesa la carretera estatal que conduce a la región maya, la cual cuando se inunda deja incomunicada a esta región (figura 312). Esta comunidad ha sufrido del problema de inundaciones constantemente. Su población para 2020 era de 1,738 habitantes (INEGI, 2020). La comunidad señalo que con el huracán Grace el domo de la localidad se daño y este no ha sido reparado.

En la figura 310 se puede observar el resultado del levantamiento de la encuesta de percepción en esta localidad, destacando lo siguiente: cierto conocimiento sobre amenazas naturales, pero principalmente identifican a las de origen hidrometeorológico (pregunta 1); no han participado en simulacros (pregunta 13); no han sido evacuados a causa de un fenómeno natural (pregunta 17). La fortaleza de la comunidad radica en que su opinión se identifican las consecuencias de una amenaza que puede convertirse en desastre (pregunta 3) y los peligros de huracán e inundación (pregunta 8). El grado de exposición de la localidad fue de 0.41.

Figura 310. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Cobá



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 311. Zona arqueológica de Cobá.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 312. Localidad de Cobá vista aérea.



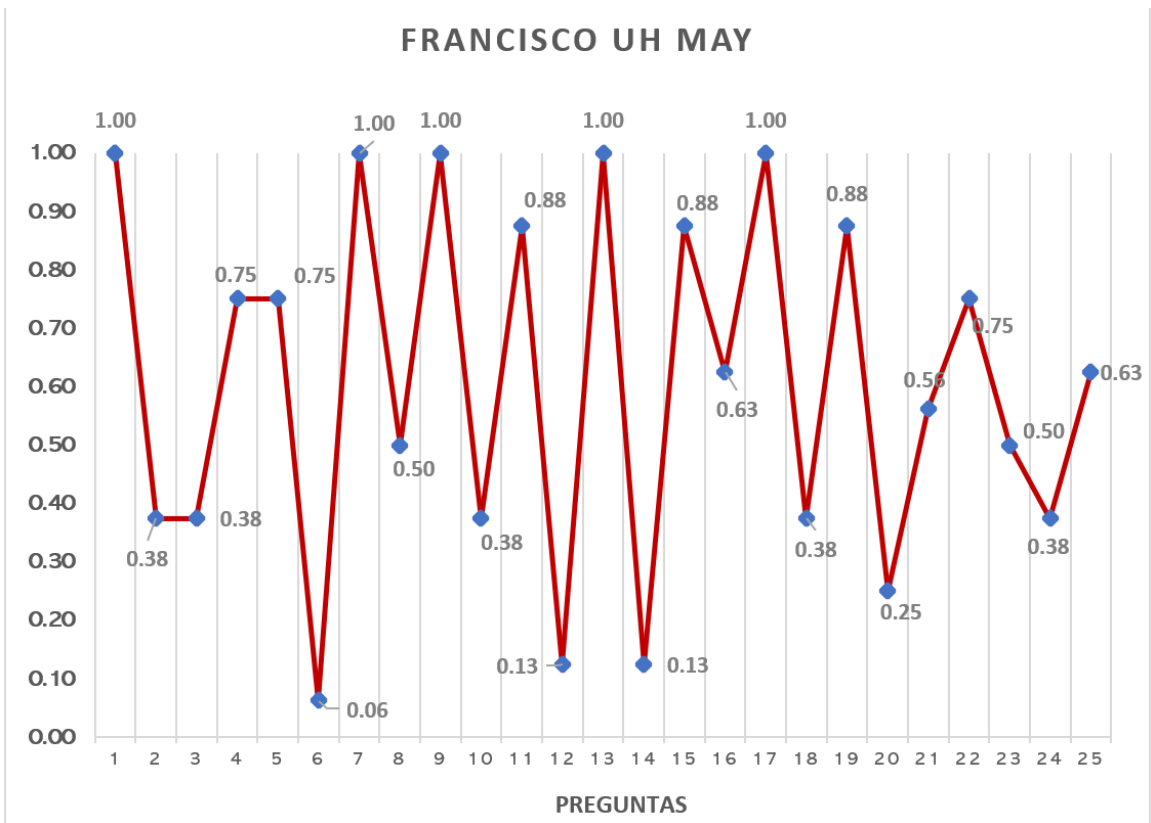
Fuente: Trabajo de campo.

Francisco Uh May

La localidad de Francisco Uh May se localiza a 24.1 kilómetros al oriente de la ciudad de Tulum. De acuerdo con el ultimo Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020) cuenta con una población de 1,288 habitantes (figura 314). Es una pequeña comunidad habitado en su mayoría por artesanos provenientes de otras partes del país, sin embargo, aun queda algunos pobladores mayas. Solo una calle lo separa de la comunidad de Macario Gómez (figura 315).

Entre las respuestas más significativas obtenidas destacan: los habitantes solo identifican 5 amenazas principalmente hidrometeorológicas (pregunta 1); la comunidad no ha quedado aislada a causa de un fenómeno natural (pregunta 7); no conocen ningún programa, obra o institución para disminuir los efectos de alguna amenaza (pregunta 9); no han participado en simulacros (pregunta 8) y no han sido evacuados (pregunta 17). Por otro lado, solo recuerdan daños en viviendas e infraestructura a causa de un fenómeno natural (pregunta 6); el medio por el que se a enterado de la llegada de alguna amenaza a sido radio, televisión o internet. El grado de exposición de la localidad fue de 0.61.

Figura 313. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Francisco Uh May



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 314. Localidad de Francisco Uh May vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 315. Localidad de Francisco Uh May vista aérea.

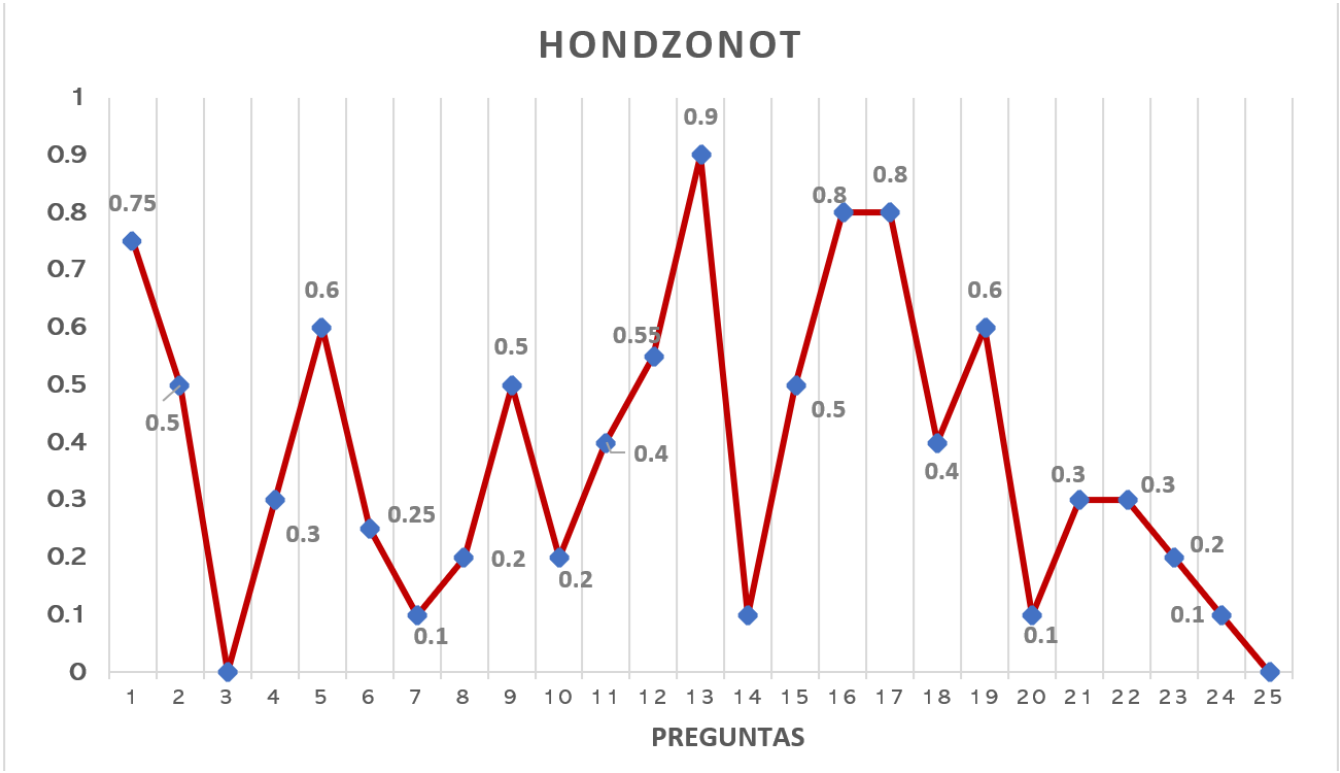


Fuente: Trabajo de campo.

Hondzonot

La localidad de Hondzonot se encuentra a 55.7 kilómetros (en dirección Oeste) de la localidad de Tulum, igualmente cercana al Estado de Yucatán (figura 317). Esta comunidad rural cuenta con 391 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020) y es parte de las comunidades con identidad maya. En la siguiente gráfica 18 se muestran los resultados obtenidos de la encuesta de percepción levantada, entre las que destacan las siguientes cuestiones: la población no ha participado en algún simulacro (pregunta 13); el apoyo brindado a causa de un fenómeno natural ha sido mínimo (pregunta 16); no han sido evacuados por algún fenómeno natural, tal como un huracán o una inundación (pregunta 17); las fuentes de peligro por fenómenos naturales solo identifican menos de cinco (pregunta 1), perdidas mínimas por algún desastre (pregunta 5) y no existe en su comunidad alguna organización que trabaje en atención a desastres (pregunta 19). El grado de exposición de la localidad fue de 0.38.

Figura 316. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Hondzonot



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 317. Localidad de Hondzonot vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 318. Localidad de Hondzonot.



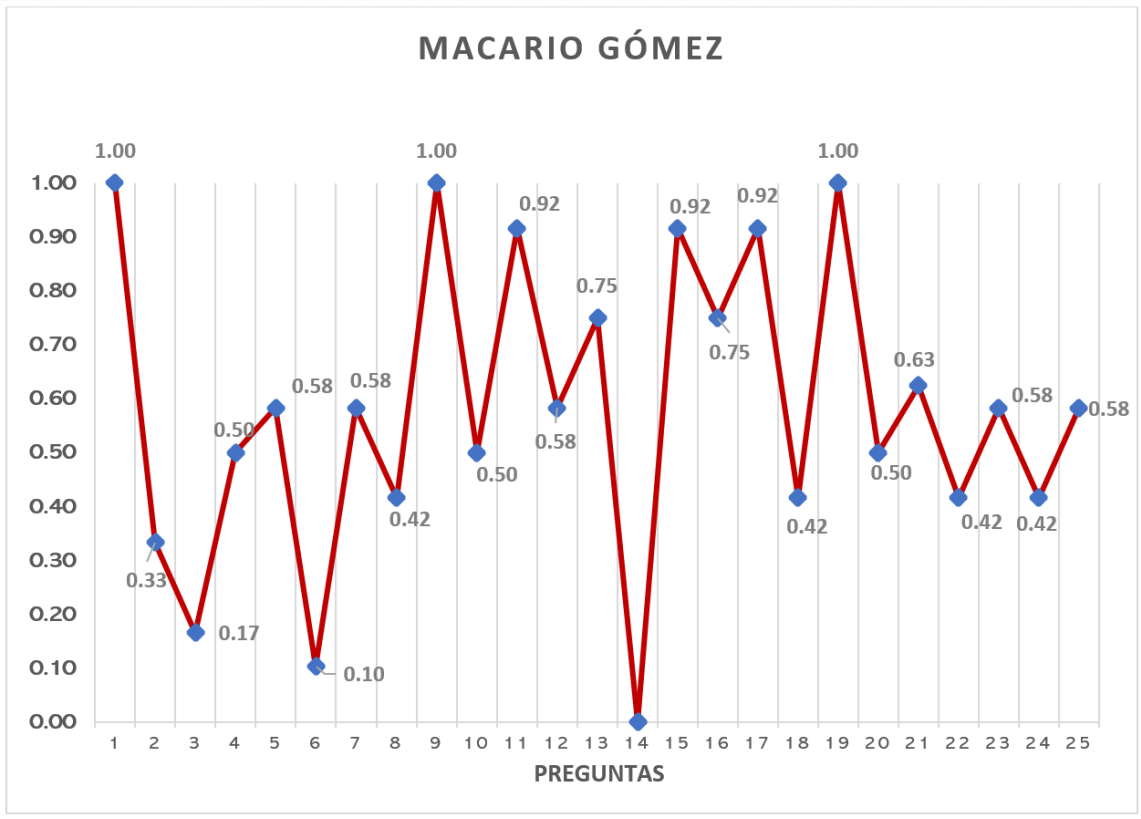
Fuente: Trabajo de campo.

Macario Gómez

La localidad rural de Macario Gómez se localiza a 22 kilómetros de la ciudad de Tulum (figura 320). Cuenta con una población de 884 habitantes (INEGI, 2020). Cuenta con población indígena de ascendencia maya, sin embargo, en últimos años han llegado pobladores de otros puntos del país, así como extranjeros. Localidad también dedicada a la venta de artesanías y servicios turísticos (figura 321).

Las respuestas obtenidas muestran que al menos reconocen 5 peligros que pueden afectar la localidad (pregunta 1); no conocen alguna obra, programa o institución que ayude a disminuir los efectos de las amenazas (pregunta 9); no existe en la localidad alguna organización que trabaje en la atención a desastres (pregunta 19). Por otro lado, si saben a dónde acudir en caso de una emergencia y cuando ha habido daños solo han sido materiales en viviendas e infraestructura. El grado de exposición de la localidad fue de 0.58.

Figura 319. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Macario Gómez



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 320. Localidad de Macario Gómez vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 321. Localidad de Macario Gómez.





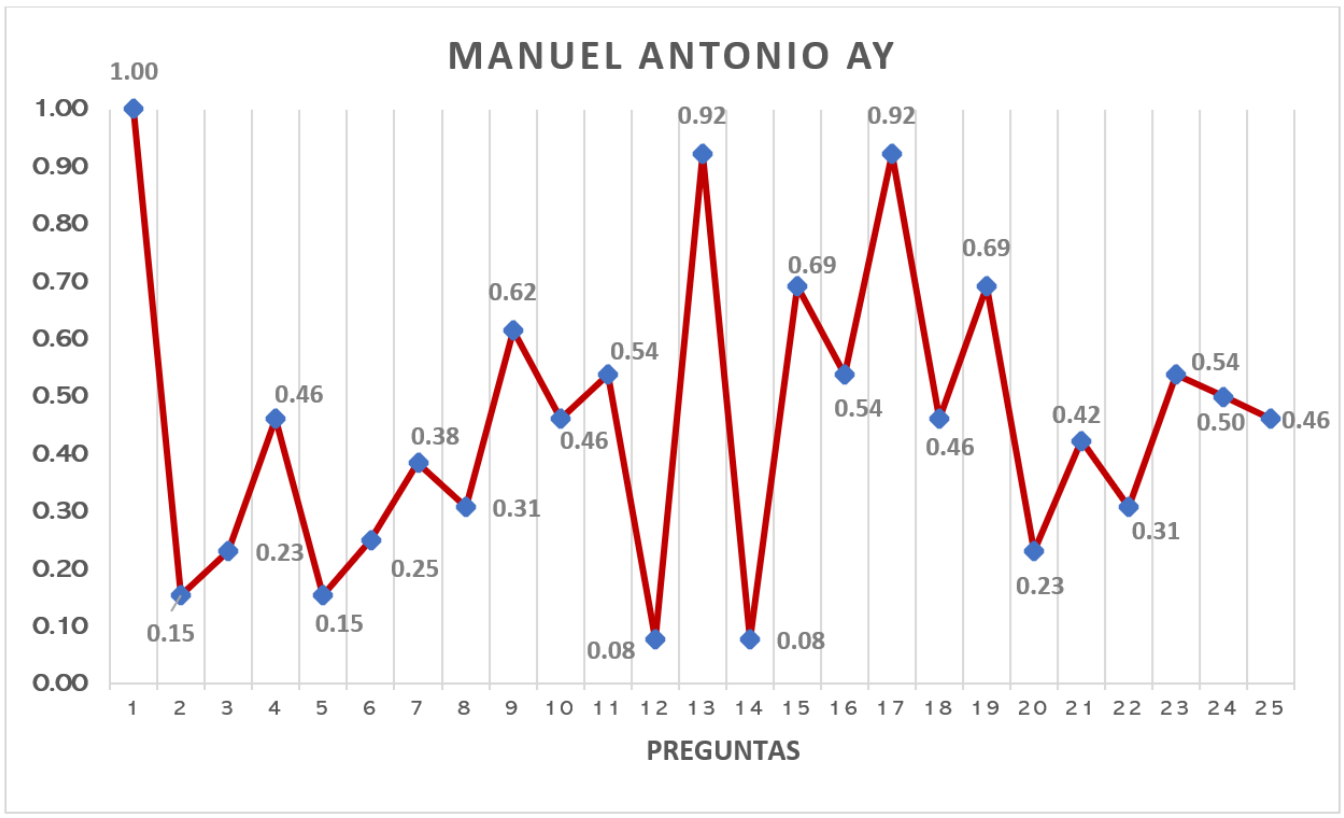
Fuente: Trabajo de campo.

Manuel Antonio Ay

La localidad rural de Manuel Antonio Ay cuenta con 621 habitantes (INEGI, 2020), algunos de estos de origen maya (figura 323). Se localiza a aproximadamente a 34 kilómetros de la ciudad de Tulum por la carretera 109. Su actividad principal se centra en la producción de artesanías y servicios turísticos (figura 324).

Entre las respuestas obtenidas se acentúan la identificación de menos de 5 peligros naturales (pregunta 1); no han tenido simulacros (pregunta 13); y no han sido evacuados a causa de un fenómeno natural (pregunta 17). Por otro lado, resalta que si se informan a través de medios de comunicación (radio, televisión, redes sociales y aplicaciones de internet) de las campañas de información emitidas por las autoridades oficiales (pregunta 12); saben a quien acudir en caso de una emergencia (pregunta 14) y si recuerdan amenazas que se han suscitado en los últimos años, como el huracán Grace, Emily, Gilberto, entre otros. El grado de exposición de la localidad fue de 0.46.

Figura 322. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Manuel Antonio Ay



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 323. Localidad de Manuel Antonio Ay vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 324. Localidad de Manuel Antonio Ay.





Fuente: Trabajo de campo.

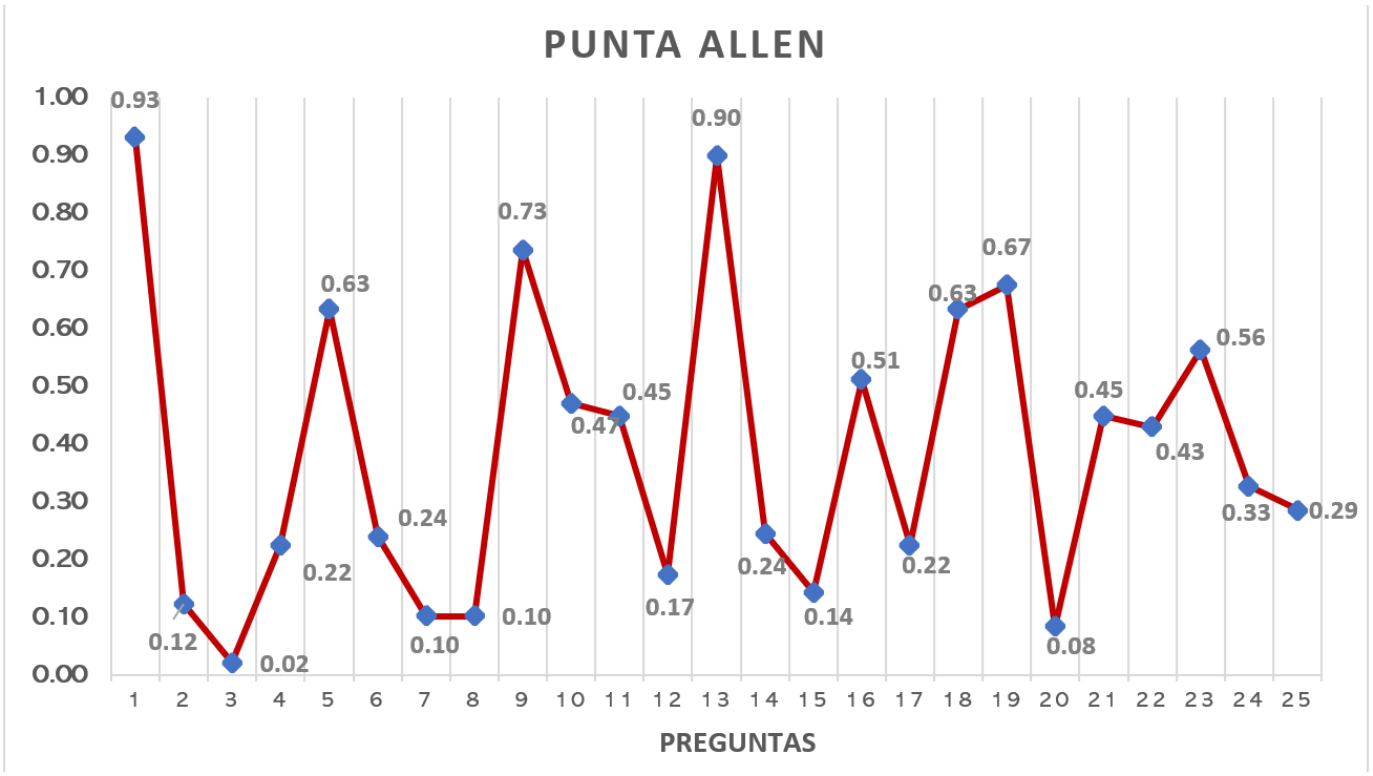
Javier Rojo Gómez (Punta Allen)

La localidad de Javier Rojo Gómez, más conocida como Punta Allen se localiza al sur del municipio (figura 326). Localidad costera que para acceder a ella se debe cruzar la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an saliendo de la ciudad de Tulum. Se localiza a 54 kilómetros aproximadamente hacia el sur por vía terrestre, ya que también se puede acceder a ella por vía marítima. Cuenta con 393 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020).

Esta localidad no puede desarrollarse en términos de modernidad ni crecimiento al encontrarse dentro de Área Natural Protegida. Si bien, su principal actividad se centraba en la captura de langosta, a tenido que diversificar su economía hacia el sector turismo. En esta localidad el suministro de energía eléctrica es solamente unas horas al día (6 am a 6 pm). Los habitantes comentan que una de las amenazas más significativas son las tormentas eléctricas y las precipitaciones abundantes las cuales hacen que en el tramo de terracería Tulum-Punta Allen a la altura de Paso Lagarto se desborde la Laguna y el mar dejando incomunicada a la población por esa vía. Al encontrarse a nivel del mar si han padecido inundaciones por lluvias extremas, frentes fríos y huracanes afectando a varias viviendas.

Las encuestas (figura 325) muestran los siguientes resultados: los habitantes de la localidad identifican al menos 5 peligros potenciales para su comunidad (pregunta 1); no han participado en simulacros, pero si mencionaron que en caso de emergencia saldrían vía marítima hacia la carretera federal 307 (pregunta 13) (figura 327). Por otro lado, reconocen muy bien cómo se produce un desastre a partir de una amenaza (pregunta 3); si conocen la existencia de la unidad de protección civil y si ha estado aislada la comunidad a causa de una interrupción de vías de comunicación por días no solo por horas, específicamente en el punto conocido como "Paso Lagarto" (pregunta 7). El grado de exposición de la localidad fue de 0.39 (figura 328).

Figura 325. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Punta Allen



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo "Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023".

Figura 326. Localidad de Punta Allen.



Fuente: Reunión con el Delegado de la localidad de Javier Rojo Gómez (Punta Allen)

Figura 327. Levantamiento de encuestas en Punta Allen.





Fuente: Trabajo de campo.

Figura 328. Levantamiento de encuestas en Punta Allen.

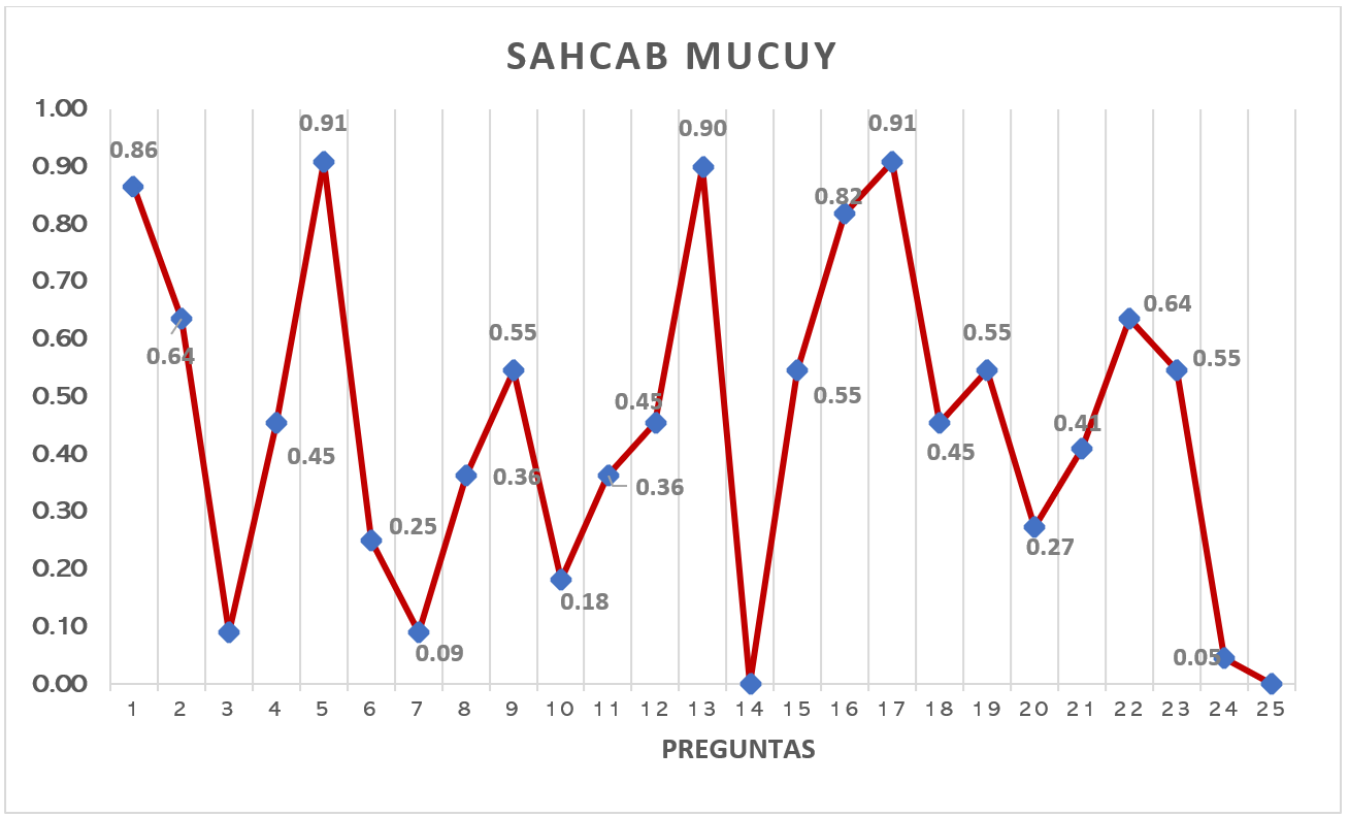


Fuente: Trabajo de campo.

Sahcab Mucuy

La localidad de Sahcab Mucuy se encuentra a 52.3 kilómetros (en dirección Oeste) de la localidad de Tulum, de igual forma cercana al Estado de Yucatán, asimismo se compone de población de origen maya (figura 330). Esta comunidad rural cuenta con 596 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). En la siguiente figura 329 se muestran los resultados obtenidos. Para la primera pregunta de la identificación de los fenómenos perturbadores los habitantes identificaron en su mayoría menos de 5 amenazas. Han perdido bienes por desastre (pregunta 5); no han participado en simulacros (pregunta 13); no han sido evacuados por alguna emergencia (17); reconocen la falta de apoyo a causa de fenómenos naturales (pregunta 16). En contraste, si sabe a quién acudir en caso de alguna emergencia y si están dispuestos a reubicarse. El grado de exposición de la localidad fue de 0.45.

Figura 329. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Sahcab Mucuy



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 330. Localidad de Sahcab Mucuy vista aérea.



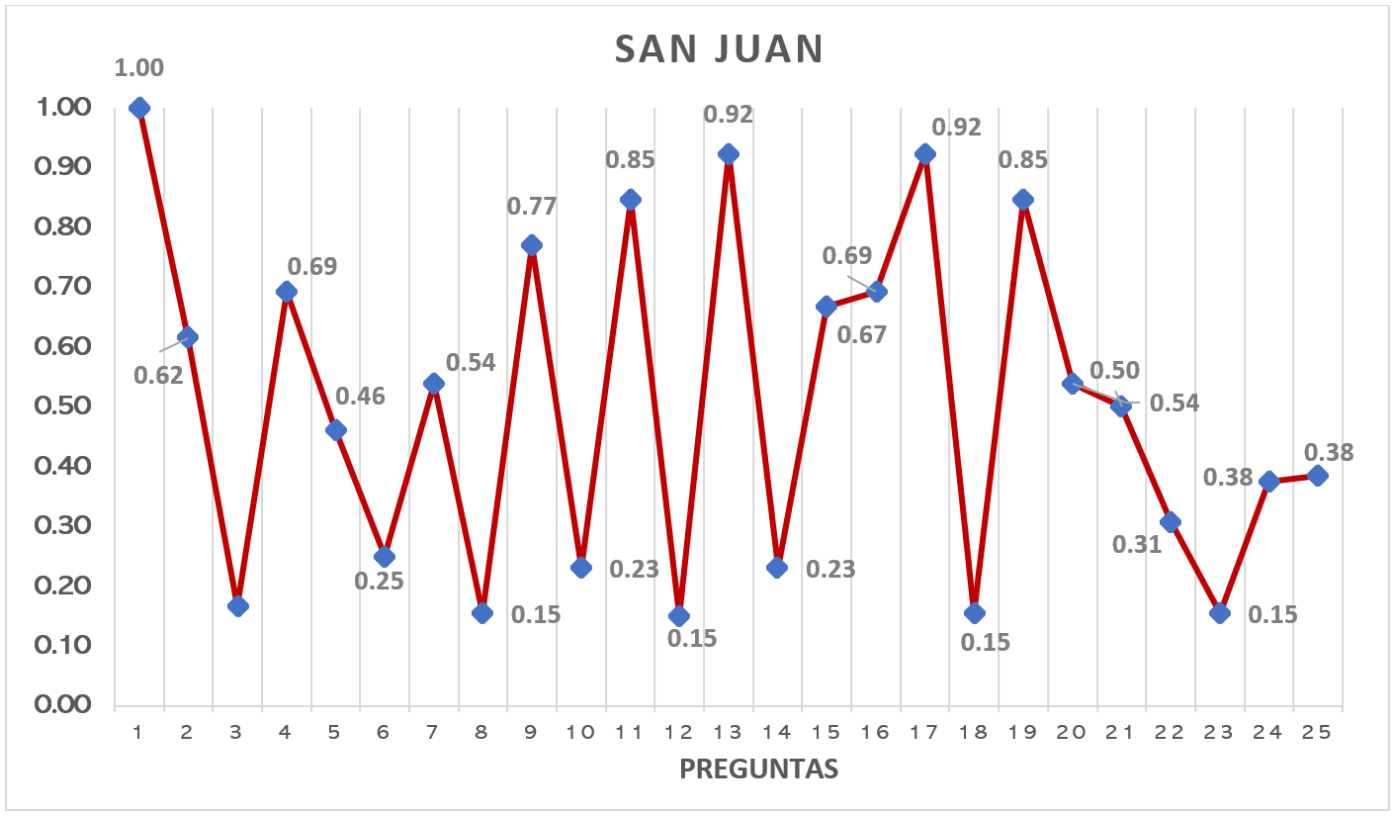
Fuente: Trabajo de campo.

San Juan

La localidad de San Juan se encuentra en la parte oriente del municipio en la región conocida como la Zona Maya de Tulum (figura 332). Cuenta con una población de 770 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020), principalmente de origen maya. Se localiza a 35.4 kilómetros de la ciudad de Tulum aproximadamente pasando la localidad de Cobá y a 16 Km de ésta última. Dedicada a actividades del sector primario, queriendo diversificar su economía hacia el turismo, ya que cuenta con una zona arqueológica denominada San Juan de Dios, pero que no se encuentra abierta al público (333).

Entre las respuestas obtenidas se encuentra (figura 304): que reconocen menos de 5 amenazas para la localidad (pregunta 1); no han participado en ningún simulacro (pregunta 13); no han sido evacuados por algún fenómeno natural (pregunta 17); no se les lleva campañas de información sobre amenazas (pregunta 11) y no cuentan con alguna organización que se dedique a la atención de desastres (pregunta 19). En contraste, tienen la percepción de identificar las amenazas (pregunta 8); cuentan con medios de comunicación para enterarse de alertas o comunicados oficiales a cerca de los peligros (pregunta 12); la comunicad esta lista para enfrentar un desastre porque realizan trabajos de prevención (pregunta 18). El grado de exposición de la localidad fue de 0.50.

Figura 331. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de San Juan



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo "Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023".

Figura 332. Localidad de San Juan.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 333. Zona arqueológica San Juan de Dios.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 334. Levantamiento de encuestas.

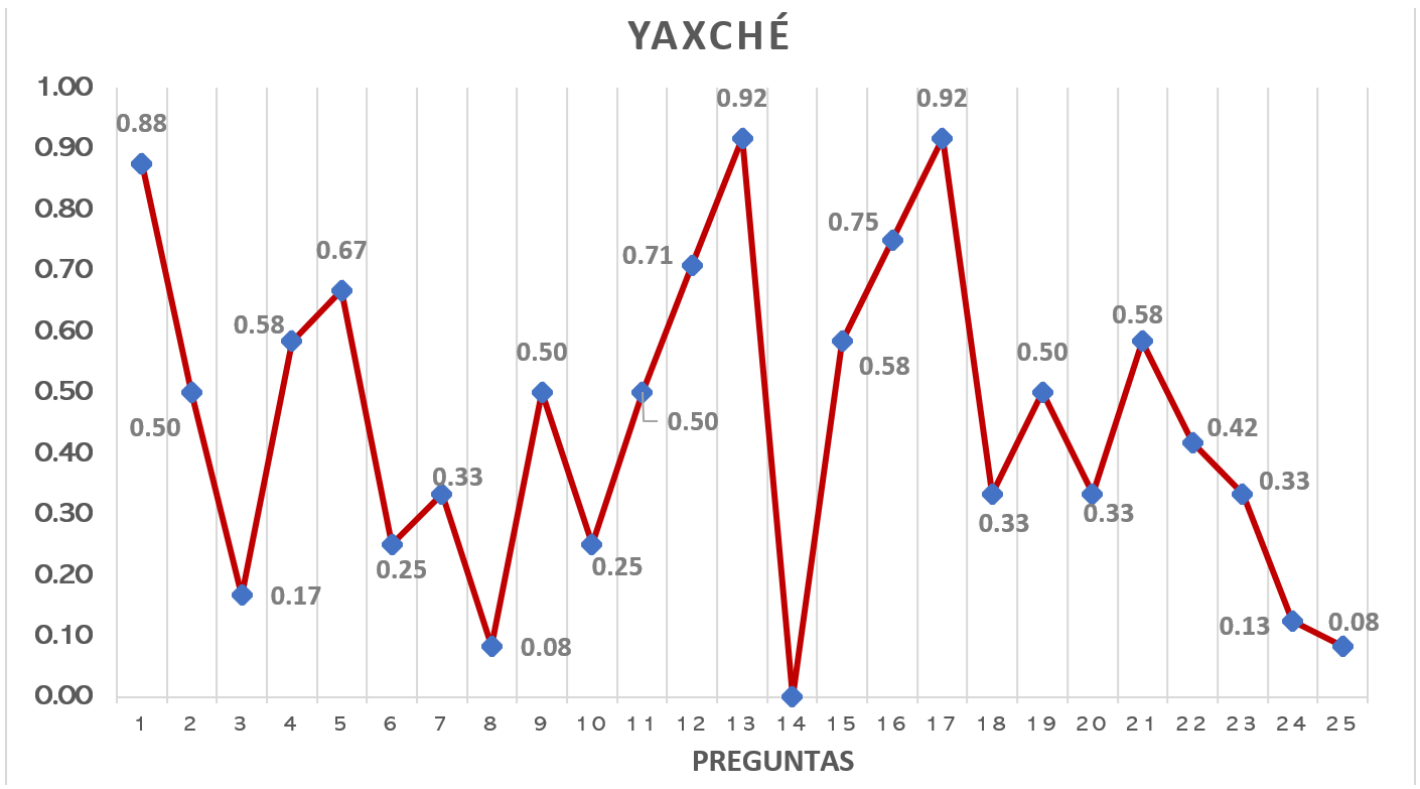


Fuente: Trabajo de campo.

Yaxché

La localidad de Yaxché se encuentra a 52.3 kilómetros (en dirección Oeste) de la localidad de Tulum, igualmente cercana al Estado de Yucatán, forma parte de las comunidades mayas ubicadas en esa región (figura 297). Esta comunidad rural cuenta con 391 habitantes de acuerdo con el último Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020). En la siguiente gráfica se exponen los resultados obtenidos a través del cuestionario aplicado. Para la primera pregunta los habitantes expresaron que reconocen menos de 5 fenómenos perturbadores que pueden afectar a su localidad. La comunidad no ha participado en simulacros (pregunta 13); no han sido evacuados a causa de alguna amenaza natural (pregunta 17); no han sufrido pérdidas de bienes o ésta ha sido mínima; el medio por el que se entera si existe algún aviso de amenaza es a través de la radio, televisión, redes sociales e internet. En contraste, si saben a quién acudir en caso de una emergencia. El grado de exposición de la localidad fue de 0.45.

Figura 335. Gráfica de Percepción del riesgo de la localidad de Yaxché



Fuente: Encuesta de percepción de riesgo “Atlas de Riesgo Municipio de Tulum 2023”.

Figura 336. Localidad de Yaxché vista aérea.



Fuente: Trabajo de campo.

6.1.1.3. Capacidad de respuesta institucional

La metodología aplicada en la elaboración de los Atlas de Riesgo para determinar cómo la Capacidad de Respuesta se relaciona con la Gestión del Riesgo de Desastres y la Vulnerabilidad Social se enfoca a la capacidad de prevención y de respuesta, la cual se refiere a la preparación antes y después de un evento de las autoridades y de la población, se proporciona a través de cuestionario.

El municipio de Tulum cuenta con una Dirección General de Protección Civil y Bomberos como primera instancia respondiente. La Dirección General de Planeación Municipal y la Dirección General de Desarrollo Territorial, Urbano Sustentable, específicamente la Dirección de Sustentabilidad Ambiental, también estuvieron participando en esta encuesta de percepción desde un enfoque de servidor público. Fue difícil lograr contactar con más funcionarios, sin embargo, los resultados obtenidos cumplen con el objetivo definido.

Cuestionario

El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario de 24 preguntas, las cuales de la 1 a la 22 se califican SI=0 y NO=1 de acuerdo con la pregunta en cuestión, las preguntas 23 y 24 se encuentran referidas al grado promedio de escolaridad que tiene el personal activo y las actividades que realiza la instancia normalmente (figura 337).

Figura 337. Cuestionario de capacidad de respuesta

Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum 2023

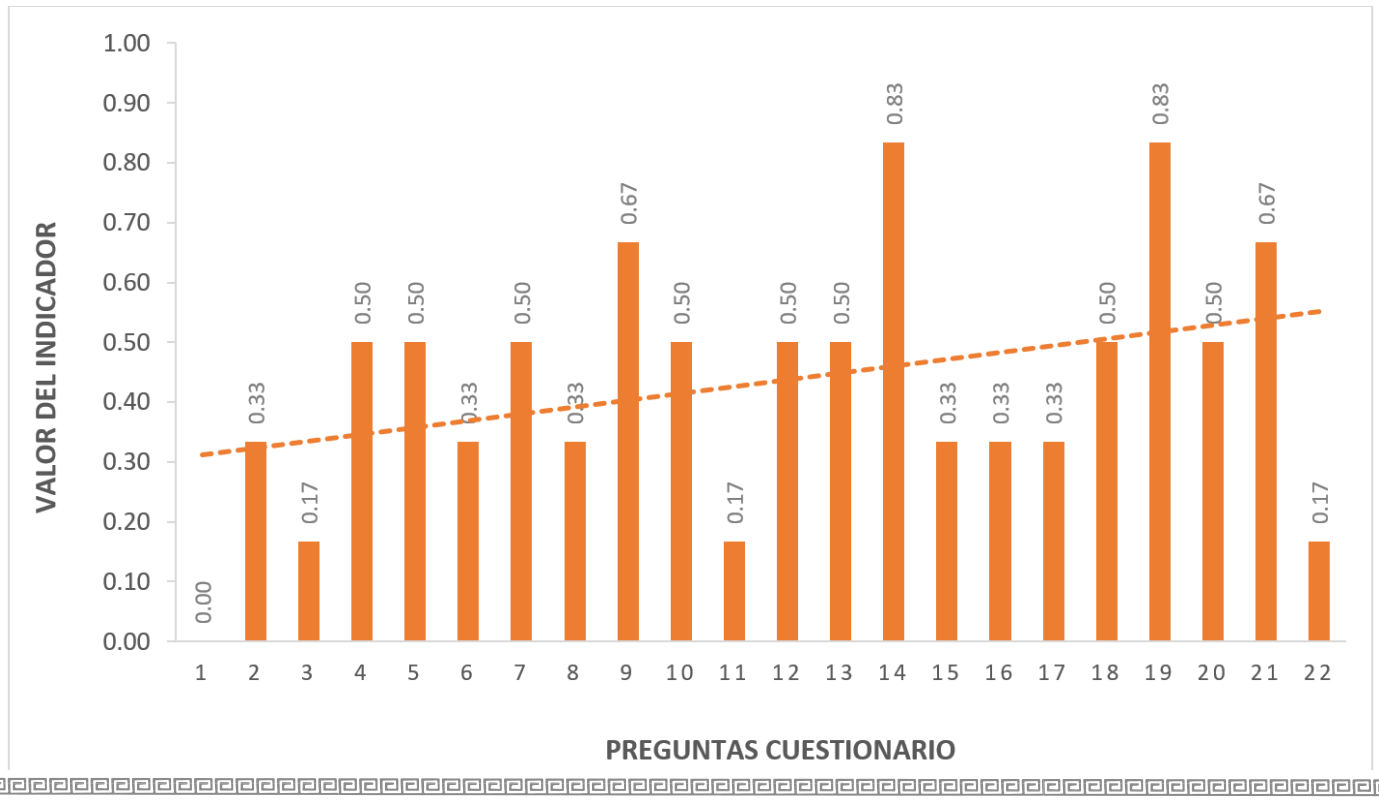
Cuestionario a la capacidad de respuesta, el cual se refiere a la preparación antes y después de un evento de las autoridades y de la población.

Núm.	Pregunta	SI	NO
1	¿El municipio cuenta con una unidad de protección civil o con algún comité u organización comunitaria de gestión de riesgo que maneje la prevención, mitigación, preparación y la respuesta?	0	1
2	¿Cuenta con un plan de emergencia?	0	1
3	¿Cuenta con un consejo municipal el cual podría estar integrado por autoridades municipales y representantes de la sociedad civil para que en caso de emergencia organice y dirija las acciones de atención a la emergencia?	0	1
4	¿Existe una normatividad que regule las funciones de la Unidad de Protección Civil, (ej. manual de organización)?	0	1
5	¿Conoce los programas federales de apoyo para la prevención, mitigación y atención de desastres?	0	1
6	¿Cuenta con mecanismos de alerta temprana?	0	1
7	¿Cuenta con canales de comunicación (¿organización a través de los cuales se pueda coordinar con otras instituciones, áreas o personas en caso de emergencia?	0	1
8	¿Las instituciones de salud municipales cuentan con programas de atención a la población (trabajo social, psicológico, vigilancia epidemiológica) en caso de desastre?	0	1
9	¿Tiene establecidas las posibles rutas de evacuación y acceso (caminos y carreteras) en caso de una emergencia o desastre?	0	1
10	¿Tiene establecidos los sitios que pueden fungir como helipuertos?	0	1
11	¿Tiene ubicados los sitios que pueden funcionar como refugios temporales en caso de desastre?	0	1
12	¿Tiene establecido un stock de alimentos, cobertores, colchonetas y pacas de lámina de cartón para casos de emergencia?	0	**1**
13	¿Tiene establecido un vínculo con centros de asistencia social (DIF, DICONSA, LICONSA, etc.) para la operación de los albergues y distribución de alimentos, cobertores, etc.?	0	**1**
14	¿Se llevan a cabo simulacros en las distintas instituciones (escuelas, centros de salud, etc.) sobre qué hacer en caso de emergencia y promueven un Plan Familiar de Protección Civil?	0	**1**
15	¿Cuenta con un número de personal activo?	0	**1**
16	¿El personal está capacitado para informar sobre qué hacer en caso de una emergencia?	0	**1**
17	¿Cuenta con mapas o croquis de su localidad que tengan identificados puntos críticos o zonas de peligro?	0	**1**
18	¿Cuenta con el equipo necesario en su unidad para la comunicación tanto para recibir como para enviar información (¿computadora, internet, fax, teléfono, etc.?	0	**1**
19	¿Cuenta con acervos de información históricos de desastres anteriores y las acciones que se llevaron a cabo para atenderlos?	0	**1**
20	¿Cuenta con equipo para comunicación estatal y/o municipal (radios fijos, móviles y/o portátiles)?	0	**1**
21	¿Cuenta con algún SIG para procesar y analizar información cartográfica y estadística con	0	**1**

Respuestas

El valor del indicador de capacidad de respuesta va de 0 a 1, siendo 0 el valor más cercano a una capacidad de respuesta ideal. En la siguiente gráfica se muestran las respuestas obtenidas para el municipio de Tulum.

Figura 338. Grafico de Capacidad de respuesta del municipio de Tulum



En el gráfico 338 se observa que la pregunta 1 referida a contar con una unidad de protección civil es la única que alcanzo el valor de 0.

Por otra parte, las preguntas 3, 11 y 22 son las que se encuentran más cercanas a un valor de 0, correspondientes al contar con un comité o consejo municipal para emergencias, la ubicación de refugios y equipo de comunicación respectivamente (gráfico 338).

Con un valor de 0.33 se encuentran 6 preguntas: 2, 6, 8, 15, 16 y 17, referidas a un plan de emergencia, mecanismos de alerta temprana, atención en el contexto de salud en caso de desastre, referidas al personal y número de personal y mapas o croquis indicando zonas de peligro. La siguiente calificación y que se aleja más del cero son la preguntas que obtuvieron un valor de 0.5: preg. 4,5,7,10,12,13,18 y 20 (gráfico 338).

Se debe poner mayor atención son las preguntas cuyo valor se encuentra cercano a 1, estas son las preguntas 9, 14, 19 y 21, las cuales hacen alusión a rutas de evacuación, simulacros en oficinas y escuelas, acervos históricos de desastres anteriores y la aplicación de geotecnologías para el análisis de información cartográfica y estadística (gráfico 338).

Para la pregunta 23, grado promedio de escolaridad, las respuestas fueron:

- Secundaria, Nivel medio (preparatoria) y Licenciatura.

Para la pregunta 24, actividades que se realizan, las respuestas fueron:

- Técnico de operación, atender emergencias, administrativo, administrativo y operativo.

- En la dirección de sustentabilidad ambiental, se expiden los permisos de remoción vegetal, se revisan los planes de manejo de residuos solidas urbanos y de manejo especial, se expiden los permisos de operación ambiental, se implementan programas para fortalecer la cultura de la separación de los residuos valorizables, en coordinación con el Estado y la Federación se implementan programas de conservación de la biodiversidad.

De la misma manera, se debe señalar que los actores municipales señalaron que existen “planes de emergencia para casos de fenómenos hidrometeorológicos de Tulum el cual se reinstala previo a la temporada de huracanes”; con base a la normatividad de regulación para protección civil se cuenta con “el reglamento de la administración pública del municipio de Tulum, Reglamento de protección civil del municipio de Tulum”; los programas de apoyo de atención a desastres que se conocen son: “Plan Marina y Plan DN-Ill”, de la Marina y del Ejercito Mexicanos, respectivamente.

Para los mecanismos de Alerta Temprana se menciona “Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales: Alerta verde — Peligro bajo; Alerta amarilla — Peligro moderado; Alerta naranja — Peligro alto; Alerta roja — Peligro máximo”. En cuanto a caneles de comunicación se manifiesta que el “Comité Operativo Especializado en Fenómenos Hidrometeorológicos, donde están presentes representantes de los tres órdenes de gobierno en materia de protección civil, en el pleno de las sesiones se plantean los informes, las necesidades y la estrategia de coordinación”. Si bien, se menciona que “en coordinación con el Sistema Municipal para el Desarrollo Integral de la Familia, el Sistema Municipal de Protección de Niñas, Niños y Adolescentes y la Dirección general de Bienestar”, se cuenta con servicios de atención a la población, pero no se encuentran especializados para casos de salud en emergencias. En cuanto a las rutas de evacuación, se destaca que “recientemente se concluyó con el proyecto de mapas abiertos (CO-MAPPER) y la capacitación a las dependencias municipales”, sin embargo, es poca la socialización que se le ha dado.

La aeropista, las canchas de futbol o beisbol en las localidades rurales, pueden emplearse como helipuertos en caso de contingencia. Por otra parte, las escuelas de los diferentes niveles educativos, cada año y previo a la temporada de huracanes se visitan todas las escuelas públicas y se determina cuáles son las que están en condiciones óptimas para ser habilitadas como refugio temporal. En cuanto a tener en almacenamiento alimentos, cobertores, colchonetas y pacas de lámina de cartón para casos de emergencia, se implementa a través del Sistema Municipal para el Desarrollo Integral de la Familia y la Dirección general de Bienestar. Asimismo, se distribuyen por el Comité Operativo Especializado en Fenómenos Hidrometeorológicos de Tulum, el cual realiza las gestiones con las dependencias del Gobierno Estatal y Federal.

Los resultados de la encuesta señalan que una debilidad es el número de personal para casos de emergencia, “personal de protección civil, en casos de emergencia se suman al esfuerzo personal de las direcciones de obras y servicios públicos, seguridad pública, salud, entre otros”. Este mismo personal se encuentra capacitado para casos de emergencia.

Se menciona que el municipio si cuenta con mapas o croquis “en el Atlas de riesgo, donde se indican puntos críticos como las zonas de inundación y zonas vulnerables a vientos de huracán, como Punta Allen, Coba, la zona de invasión o asentamiento irregular, entre otros”. “Todas las oficinas del Municipio tienen equipo de cómputo, de impresión y acceso a internet”. Como ya se mencionó, el municipio no cuenta en ninguna de sus dependencias con acervos históricos de los desastres ocurridos en su territorio.

En cuanto a equipos de comunicación son “la Dirección de Protección Civil y la Secretaría de Seguridad Pública y Protección Ciudadana de Tulum”, los que cuentan con dichos dispositivos. Sin embargo, no cuentan con Sistemas de Información Geográfica propios para el uso de las acciones y actividades del municipio, pero “pero se usan plataformas libres como *Google Maps, Earth, OpenStreetMap, Bing Maps*, entre otros”. De esta forma, como sistema generalizado para todas las direcciones, no se cuenta con Sistemas GPS, algunas manejan esta tecnología, no obstante, se opina que “hay que fortalecer con capacitación al personal”.

De acuerdo con la Ley General de Protección Civil (DOF 03-06-2014), los primeros respondientes ante una emergencia profesional corresponden a las Unidades Internas de Protección Civil pública o privada, así como a las autoridades locales o regionales notificadas de la emergencia. Asimismo, el ejercicio de las facultades de vigilancia y la aplicación de las medidas de seguridad son responsabilidad primordial de los organismos de protección civil municipales o delegacionales.

En caso de que la emergencia o desastre supere la capacidad de respuesta del municipio o delegación, acudirá a la instancia estatal o del Distrito Federal correspondiente, en los términos de la legislación aplicable. Si ésta resulta insuficiente, se procederá a informar a las instancias federales correspondientes, las que actuarán de acuerdo con los programas establecidos al efecto, en los términos de esta Ley y de las demás disposiciones jurídicas aplicables.

Finalmente, y de acuerdo con la metodología del CENAPRED (2006), se calcula el Grado de Vulnerabilidad Social (GVS), ver tabla 123. El valor final para la medición de la vulnerabilidad social se obtiene de la siguiente manera, una vez obtenida la calificación final de los tres aspectos a evaluar (características socioeconómicas, capacidad de respuesta y percepción local de riesgo):

$$GVS = (R_1 * 0.5) + (R_2 * 0.25) + (R_3 * 0.25)$$

Donde:

GVS = Grado de vulnerabilidad social asociada a desastres.

R_1 = Resultado de los indicadores socioeconómicos.

R_2 = Resultado del cuestionario de capacidad de prevención y respuesta.

R_3= Resultado del cuestionario de percepción local de riesgo.

Tabla 123. Grado de vulnerabilidad social

Clases	Grado de Vulnerabilidad Social
De 0 a 0.20	Muy Bajo
De 0.21 a 0.40	Bajo
De 0.41 a 0.60	Medio
De 0.61 a 0.80	Alto
Mas de 0.80	Muy Alto

Fuente: CENAPRED, 2006.

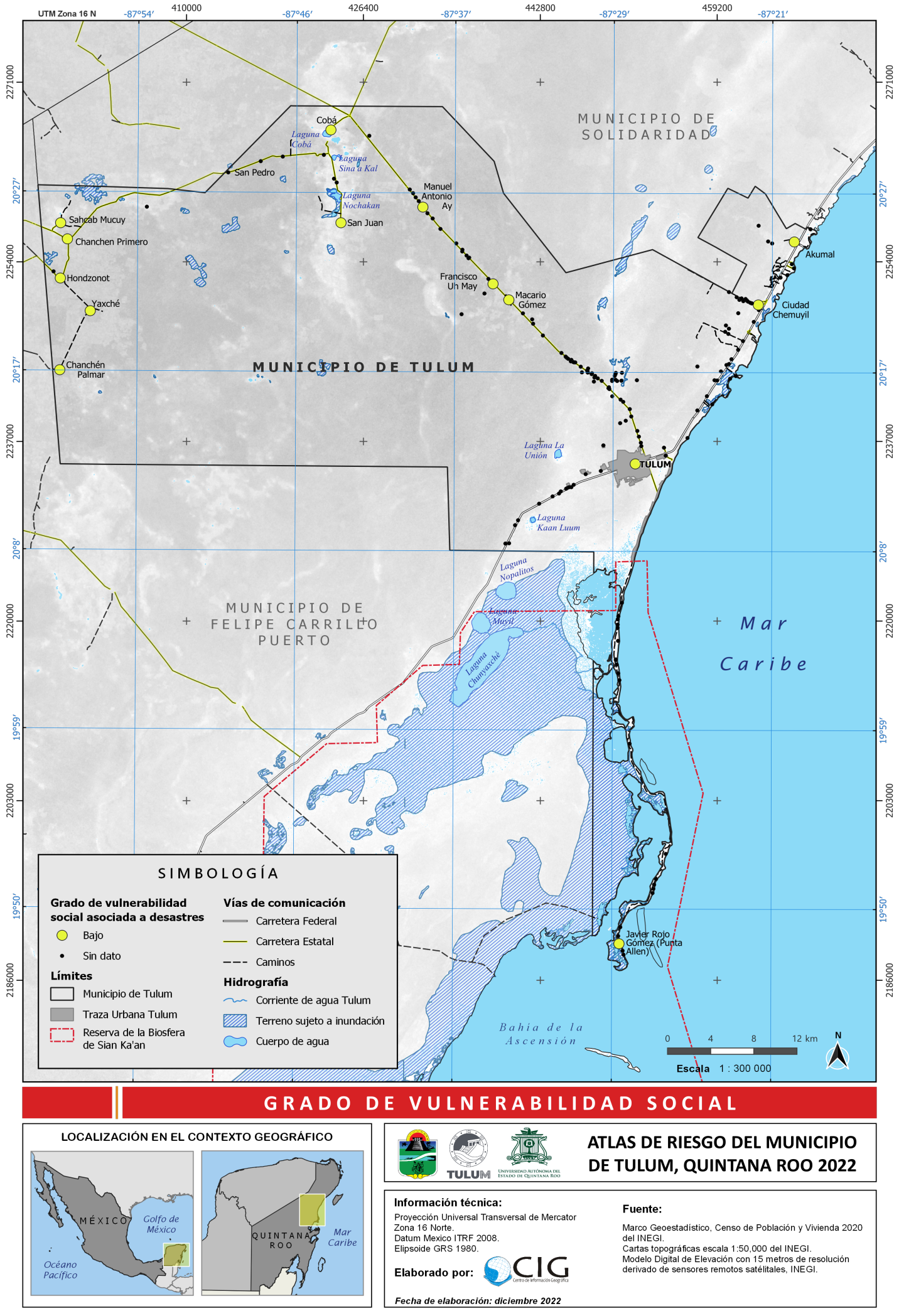
Posteriormente de realizar las operaciones correspondientes para calcular la vulnerabilidad social para cada una de las localidades del municipio de Tulum (tabla 124).

Tabla 124. Grado de Vulnerabilidad Social - GVS

Localidad	Indicadores socioeconómicos (R1)		Capacidad De Respuesta (R2)		Percepción Local Riesgo (R3)		GVS	Grado de Vulnerabilidad
Tulum	0.08	0.04	0.43	0.1075	0.76	0.19	0.34	Bajo
Akumal	0.12	0.06	0.43	0.1075	0.4	0.1	0.27	Bajo
Cobá	0.21	0.11	0.43	0.1075	0.41	0.1025	0.32	Bajo
Francisco Uh May	0.21	0.11	0.43	0.1075	0.61	0.1525	0.37	Bajo
Chanchen Primero	0.29	0.14	0.43	0.1075	0.36	0.09	0.34	Bajo
Macario Gómez	0.19	0.10	0.43	0.1075	0.58	0.145	0.35	Bajo
San Juan	0.29	0.14	0.43	0.1075	0.5	0.125	0.38	Bajo
Manuel Antonio Ay	0.19	0.10	0.43	0.1075	0.46	0.115	0.32	Bajo
Chancén Palmar	0.31	0.15	0.43	0.1075	0.36	0.09	0.35	Bajo
Sahcab Mucuy	0.19	0.10	0.43	0.1075	0.45	0.1125	0.32	Bajo
Ciudad Chemuyil	0.12	0.06	0.43	0.1075	0.33	0.0825	0.25	Bajo
Javier Rojo Gómez	0.04	0.02	0.43	0.1075	0.39	0.0975	0.23	Bajo
Hondzonot	0.25	0.13	0.43	0.1075	0.38	0.095	0.33	Bajo
Yaxché	0.23	0.11	0.43	0.1075	0.45	0.1125	0.33	Bajo

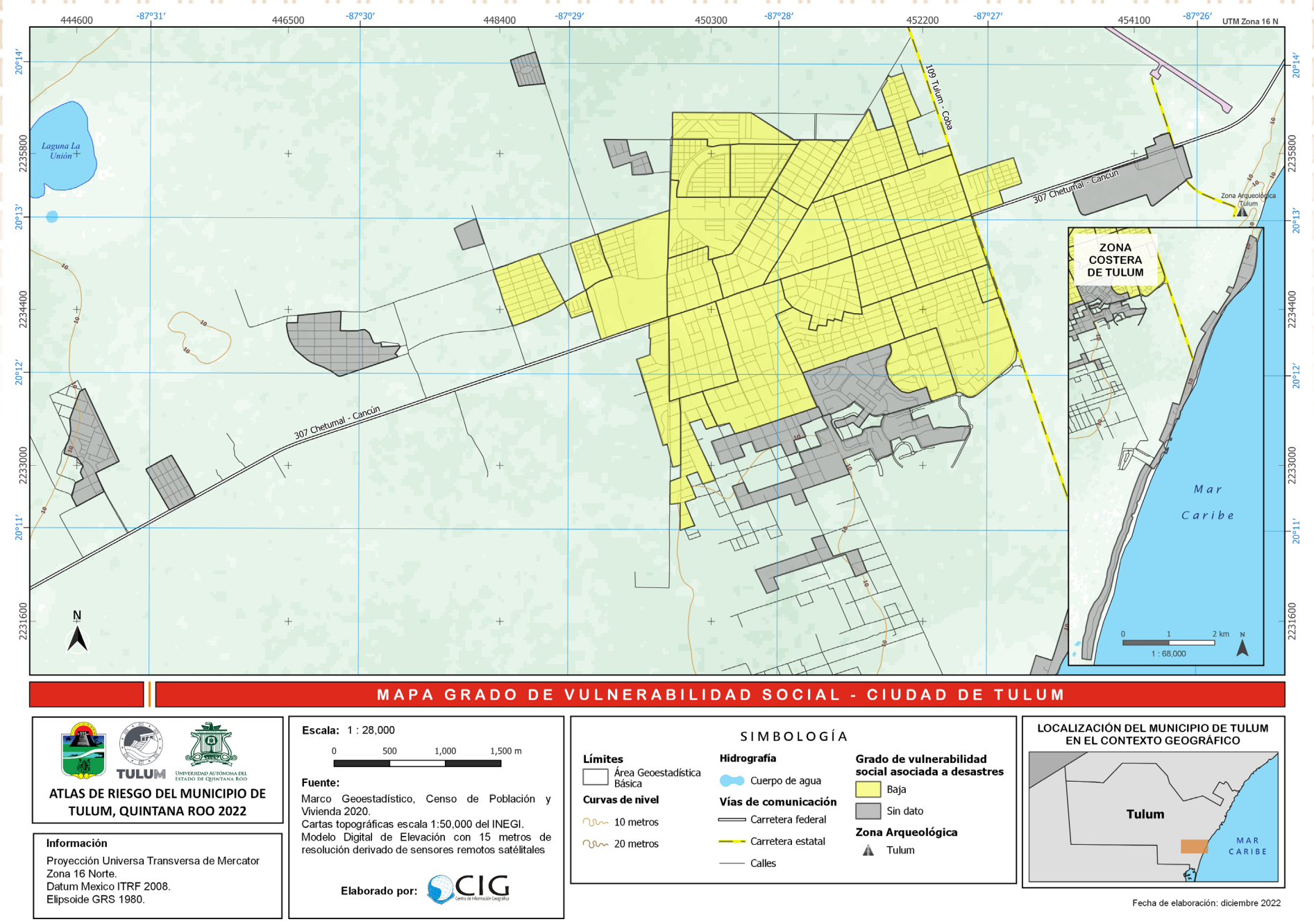
El grado de vulnerabilidad de una persona, un hogar o un grupo de personas está determinado por su exposición a los factores de riesgo y su capacidad para afrontarlos y los medios con los que cuente. En este sentido, y bajo los esquemas metodológicos indicados el GVS para el municipio de Tulum resulto de 0.32 que en calificación cualitativa se considera bajo.

Figura 339. Grado de vulnerabilidad social a nivel localidad



Fuente: Elaboración propia.

Figura 340. Grado de vulnerabilidad social para la ciudad de Tulum



Fuente: elaboración propia

6.1.1.4. Vulnerabilidad física

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) define el concepto de vulnerabilidad como la susceptibilidad o tendencia de los sistemas expuestos a ser afectados o perjudicados por la influencia de fenómenos perturbadores. En otras palabras, la vulnerabilidad se vincula directamente al grado de pérdida anticipada en caso de que ocurra un evento desestabilizador. Cuando se hace referencia a la vulnerabilidad física de una vivienda, se está aludiendo a dos aspectos fundamentales: en primer lugar, a la capacidad estructural de la vivienda para resistir las fuerzas externas; y en segundo lugar, a la posibilidad de que sufra algún tipo de daño debido a eventos adversos, como por ejemplo, los vientos de un huracán.

El supuesto fundamental radica en considerar la vivienda como un ente que va más allá de su materialidad, adquiriendo un valor simbólico y ocupando un lugar central en el patrimonio de los individuos. La vivienda no solo proyecta el estatus social de sus propietarios, sino que también refleja sus capacidades económicas. Además, trasciende su dimensión física al representar un nexo de inversiones tanto financieras como emocionales, especialmente a largo plazo (Bourdieu, 2003:35). Esta peculiar dualidad la convierte en una entidad idónea para el análisis de la vulnerabilidad.

Las variables relacionadas con el drenaje y el suministro de agua poseen un valor que va más allá de lo meramente técnico. Estas variables pueden ser interpretadas como un reconocimiento, tanto formal como informal, por parte de las autoridades hacia las colonias que constituyen los núcleos de población. En caso de zonas categorizadas como asentamientos irregulares, la probabilidad de que las autoridades municipales provean servicios básicos es notablemente reducida.

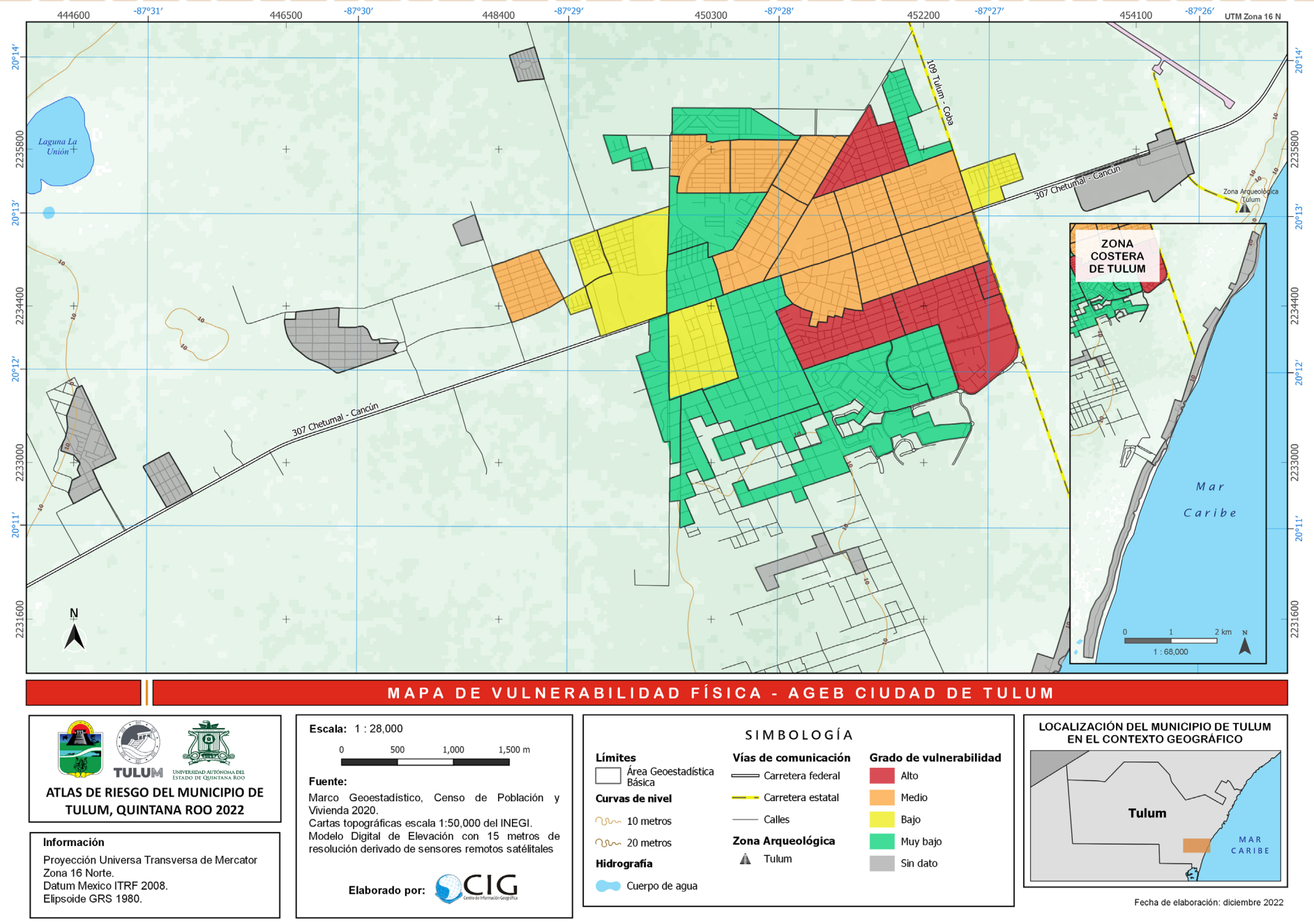
La vulnerabilidad física se cuantifica en términos de la probabilidad de daño para un sistema expuesto. Esta probabilidad se traduce, de manera práctica, en el potencial de daño que una vivienda podría sufrir. Para el atlas de Riesgo de Tulum, hemos establecido cinco niveles de vulnerabilidad y presentamos los resultados tanto a nivel de AGEB urbana como de localidad. Estos resultados se basan en el porcentaje de viviendas con un nivel alto de vulnerabilidad con respecto al total. Dicho nivel alto de vulnerabilidad en una localidad o AGEB se determina a partir de la suma de viviendas que presentan características intrínsecas de vulnerabilidad.

Para establecer estas características se tomaron tres variables del Censo de Población y Vivienda de 2020 del INEGI, las viviendas con piso de tierra, las viviendas con 1 cuarto y las viviendas sin servicios.

Estas características se han seleccionado cuidadosamente, ya que ofrecen una visión indirecta pero reveladora sobre la tipología de viviendas más propensas a ser vulnerables. Por ejemplo, el hecho de que una vivienda tenga un piso de tierra suele estar asociado con materiales de construcción autóctonos, como el bahareque, la madera o el huano, que pueden ser menos resistentes ante situaciones extremas.

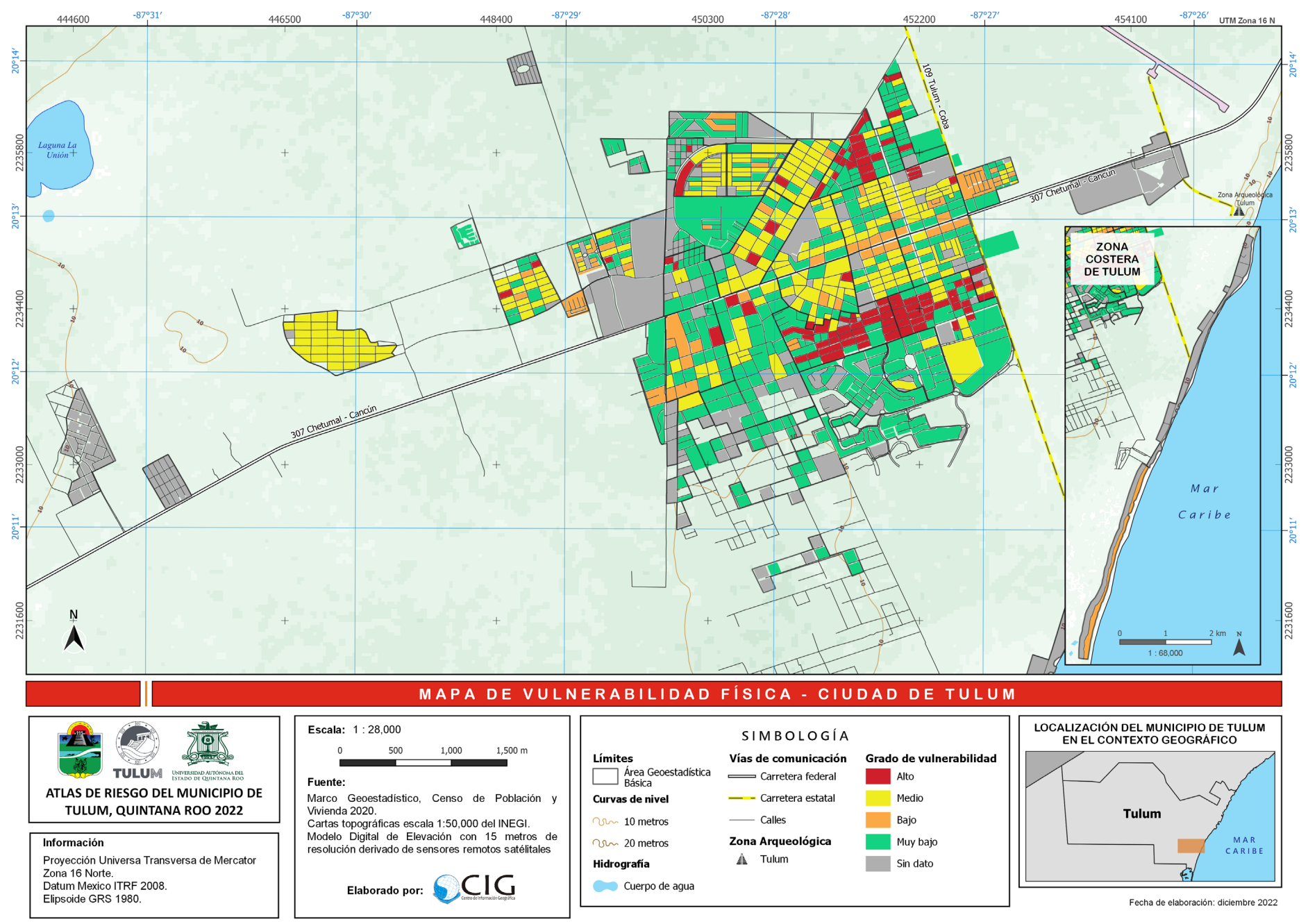
Viviendas con piso de tierra	Viviendas particulares habitadas con piso de tierra. Comprende las viviendas particulares para las que se aptaron las características de la vivienda, clasificadas como casa independiente, departamento en edificio, vivienda o cuarto en vecindad y vivienda o cuarto en azotea y a las que no especificaron clase de vivienda.
Viviendas con 1 cuarto	Viviendas particulares habitadas que tienen un solo cuarto. Comprende las viviendas particulares para las que se captaron las características de la vivienda, clasificadas como casa independiente, departamento en edificio, vivienda o cuarto en vecindad y vivienda o cuarto en azotea y a las que no especificaron clase de vivienda. Excluye la estimación del número de personas y de viviendas particulares sin información de ocupantes
Viviendas sin servicios	Viviendas particulares habitadas que tienen luz eléctrica, agua entubada dentro o fuera de la vivienda, pero dentro del terreno, así como drenaje. Comprende las viviendas particulares para las que se captaron las características de la vivienda, clasificadas como casa independiente, departamento en edificio, vivienda ocuarto en vecindad y vivienda o cuarto en azotea y a las que no especificaron clase de vivienda.

Figura 341. Vulnerabilidad física por Área Geoestadística Básica de la ciudad de Tulum



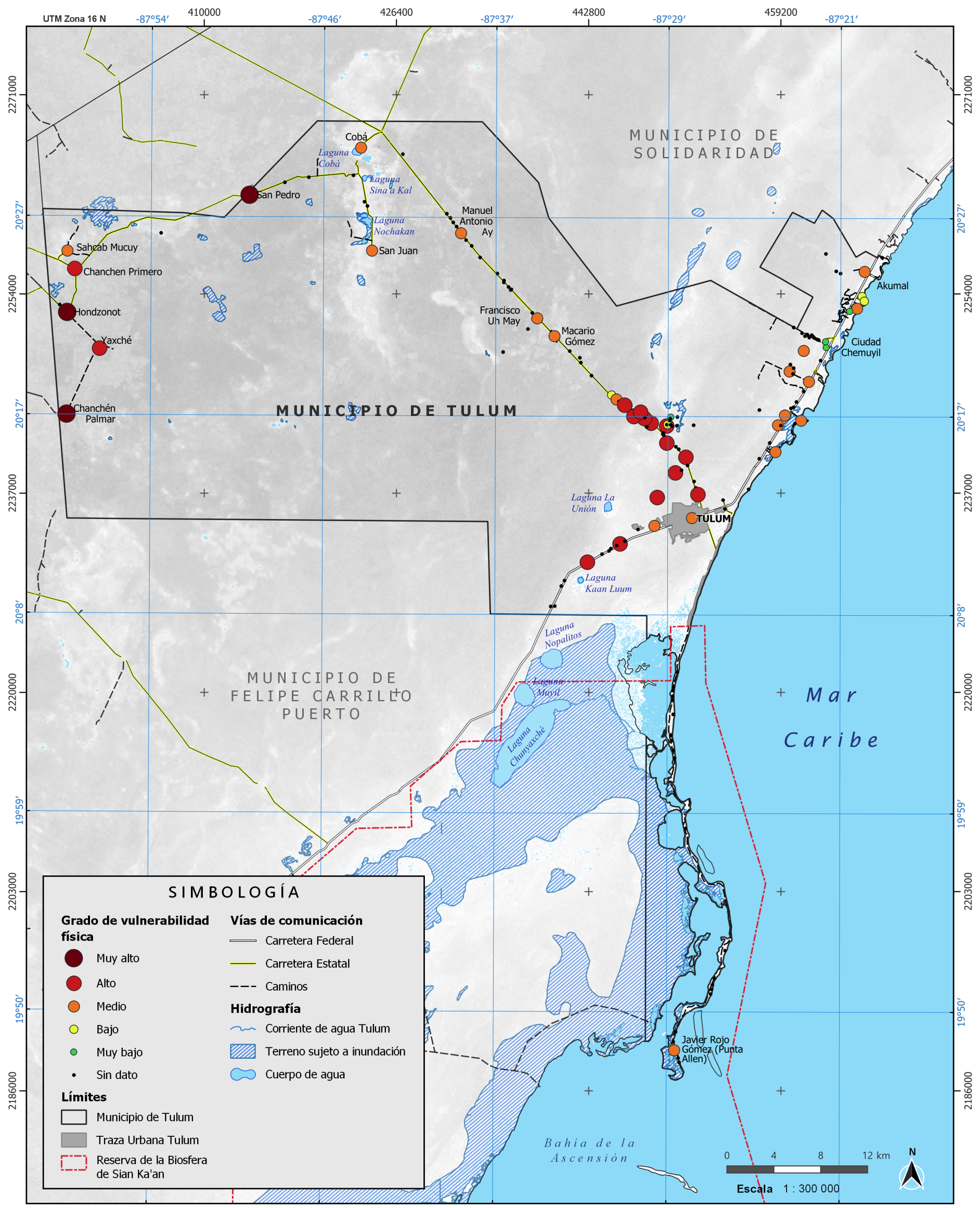
Fuente: Elaboración propia

Figura 342. Vulnerabilidad física por manzana de la ciudad de Tulum



Fuente: Elaboración propia

Figura 343. Vulnerabilidad física por localidad del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia



Fase IV
Riesgo / Exposición

7. FASE IV. RIESGO

7.1. El Riesgo y sus componentes

De acuerdo con el CENAPRED (2006) el Riesgo es la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables en las personas, sus bienes o la sociedad que conforman como consecuencia del impacto de un fenómeno perturbador. A su ves, la Ley General de Protección Civil lo define como daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultando de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador.

El riesgo se manifiesta en diversas formas y contextos, desde las amenazas naturales como terremotos, inundaciones y huracanes, hasta los riesgos tecnológicos, sanitarios, socio organizativos y medioambientales que enfrentamos en la actualidad. Lo anterior deja claro que el riesgo implica la existencia de una Agente perturbador (amenaza) que pueda ocasionar algún daño a algún Sistema afectable (Asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva) en una magnitud que puede ocasionar un desastre (CENAPRED, 2006)

En este contexto, la Gestión Integral del Riesgo (GIR) emerge como un enfoque multidisciplinario y sistemático para comprender, evaluar y abordar la incertidumbre inherente a nuestras acciones y entornos y los Atlas de Riesgo (AR) constituyen el marco de referencia para la elaboración de políticas y programas en todas las etapas de la GIR.

Es importan señalar que las causas profundas o subyacentes que aumentan el riesgo están ligadas a factores estructurales tales como las políticas de desarrollo nacional, la cultura y los hábitos de una sociedad además de las desigualdades sociales que existan (Nationen, 2022).

Cabe señalar que a nivel mundial los desastres reportados en las últimas dos décadas han aumentado de forma significativa. Si comparamos el periodo comprendido entre 1970 y 2000 con los últimos 20 años el promedio anual de desastres ha pasado de 90 a 100 por año a 350-500 por año. (Nationen, 2022). México es uno de los 40 países con mayores pérdidas económicas causadas por desastres (casi 50,000 millones de dólares en 30 años) de acuerdo con MIRC(2014).

Por ello, en esta Fase IV del Atlas de Riesgo del municipio de Tulum exploraremos analizaremos el riesgo utilizando un enfoque cuantitativo y cualitativo, así como las herramientas y técnicas de sistemas de información geográfica y análisis espacial. Este análisis esta basado en la determinación de los peligros de la Fase II y su correlación con los factores estructurales (infraestructura, vivienda, equipamiento e indicadores socioeconómicos y demográficos) determinados en la Fase III de este Atlas lo que permite detectar, clasificar y zonificar las áreas de peligros.

7.1.1. Los componentes del riesgo

El riesgo puede estudiarse separandolo en varios componentes que influyen en la probabilidad y el impacto de un evento adverso. Los componentes principales del riesgo son los siguientes:

- **Agente perturbador:** Fenómeno natural o generado por el hombre que tiene la probabilidad de ocasionar un evento adverso sobre un sistema afectable (p. ej los asentamientos humanos)(Guevara, et al, 2006).

- **Peligro:** Es la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino (agente perturbador, amenaza) de cierta intensidad, durante cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. La probabilidad de daño puede ser expresada en términos de porcentaje, frecuencia o una escala cualitativa (por ejemplo, baja, moderada, alta). Cuanto mayor sea la probabilidad de que ocurra un evento adverso, mayor será el riesgo asociado.

Para definir el peligro tambien puede ser necesario relacionarlo con dos medidas, la magnitud y la intensidad, entendidas como:

- **Magnitud:** Este término se refiere a la dimensión física y cuantitativa de un fenómeno o evento, específicamente en lo que respecta a su tamaño, potencial destructivo y la cantidad de energía que libera. La magnitud es esencial para comprender la escala absoluta de un evento y suele expresarse en valores numéricos, como en el caso de terremotos, donde se utiliza la escala de Richter para cuantificar la magnitud sísmica. En otras palabras, la magnitud nos proporciona una medida objetiva y cuantitativa del evento, lo que permite comparar su gravedad con otros fenómenos similares.

- **Intensidad:** En contraste, la intensidad se relaciona con la medida subjetiva de la fuerza con la que un fenómeno se manifiesta en un lugar específico o sitio determinado. No se trata de una medición absoluta, sino de una evaluación cualitativa que considera cómo afecta el evento a las personas, estructuras y el entorno en un lugar particular. La intensidad se basa en observaciones directas y testimonios de testigos o sensores en la ubicación afectada y puede variar significativamente de un lugar a otro, incluso en eventos con la misma magnitud. Por ejemplo, en un terremoto, la intensidad podría describirse en términos de la sacudida que se sintió, los daños sufridos por edificios y la reacción de las personas en la zona afectada.

Para algunas amenazas (agentes perturbadores) la forma más común de representar el comportamiento del fenómeno son los periodos de retorno.

- **Periodos de retorno:** Lapso promedio de tiempo que transcurre entre un fenómeno y otro de igual intensidad. Sin embargo, para muchos fenómenos no es posaible representar el periodo de retorno ya que no existe información suficiente (Guevara, et. al., 2006) o el comportamiento de los mismo se modifica por otros fenómenos globales tales como el calentamiento climático. Por lo anterior, se recurre a las escalas cualitativas de uso más común y de mayor utilidad.

Otro componente importante es la Exposición o Grado de Exposición, que nos brinda una medida de la factibilida de daños:

- **Exposición o Grado de Exposición:** Se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio donde ocurre el peligro y que son factibles de ser dañados. El valor de los daños puede expresarse en algunas ocasiones en pérdidas económicas por lo que este componente variará con el tiempo.

Finalmente, el componente sobre el cual se concentran la mayoria de las acciones de regulación, mejora o mitigación es la Vulnerabilidad:

Vulnerabilidad: Se refiere a la susceptibilidad de un sistema o entidad a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales (Fracción LVIII artículo 2 de la Ley General de Protección Civil). Una mayor vulnerabilidad significa que el sistema es menos capaz de resistir o recuperarse de un evento adverso.

En la gestión integral de riesgos, es esencial comprender estos componentes y llevar a cabo una evaluación adecuada para tomar decisiones informadas sobre cómo mitigar o controlar los riesgos en una organización o situación específica.

Uno de los enfoques mas aceptados del riesgo es aquel que esta compuesto de tres factores que son la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos, de forma esquemática el riesgo puede presentarse de esa manera:

Riesgo=f(Peligro,Vulnerabilidad,Exposición)

Donde el peligro de los fenómenos perturbadores debe definirse, siempre que sea posible a través de parámetros cuantitativos que señalen su intensidad y magnitud, entendiendo la intensidad como la fuerza con la que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado; y la magnitud como el tamaño del fenómeno, su potencial destructivo y la energía que libera.

De esta manera, se puede definir que el riesgo es la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) a grado tal, que constituya un desastre (CENAPRED, 2006).

7.2. Riesgo por ciclones tropicales

El concepto de riesgo de desastres, se refiere a la probabilidad de sufrir pérdidas o daños, ya sea en la infraestructura, las viviendas o incluso en la vida de la población en una determinada localidad. Este riesgo se compone de dos factores esenciales: el peligro y la vulnerabilidad. La comprensión y cuantificación de estos peligros, la evaluación de la vulnerabilidad y, en consecuencia, la determinación de los niveles de riesgo son pasos cruciales para establecer procedimientos y medidas efectivas de mitigación destinadas a reducir los efectos adversos de los desastres.

En el caso específico del municipio de Tulum, se llevaron a cabo dos escalas geográficas de análisis: una a nivel de localidad y otra a nivel de la ciudad de Tulum en su conjunto. Los escenarios de peligro relacionados a los ciclones tropicales, se evaluaron utilizando el Índice de Peligro por Ciclones Tropicales (IPCT) que se encuentra en el apartado ***5.3.5 Ciclones tropicales*** de este Atlas. Este índice revela valores de peligro más elevados en las áreas cercanas a la costa, especialmente en la parte media del municipio, donde se ubica la ciudad de Tulum.

La vulnerabilidad social se describe en el apartado ***6.1 sobre Vulnerabilidad Social***, mientras que la vulnerabilidad física se aborda en el apartado ***6.2 referente a Vulnerabilidad Física*** de este mismo Atlas. Ambos tipos de vulnerabilidad representan la susceptibilidad del sistema a sufrir daños y se expresan en cinco categorías: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto.

Para calcular el riesgo asociado a los ciclones tropicales, se optó por emplear una metodología que se basa en el sobreposicionamiento de capas de datos mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el peligro y la vulnerabilidad (tanto social como física) de las localidades del municipio, así como las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) y Manzanas de la ciudad de Tulum. La combinación de estos factores permitió obtener un indicador que estima el nivel de riesgo.

La interpretación de los resultados de este análisis se llevó a cabo mediante la estandarización y homologación de bases de datos, la utilización de modelos matemáticos para calcular el peligro y la vulnerabilidad, además de ponderaciones cualitativas para los niveles de riesgo presentados.

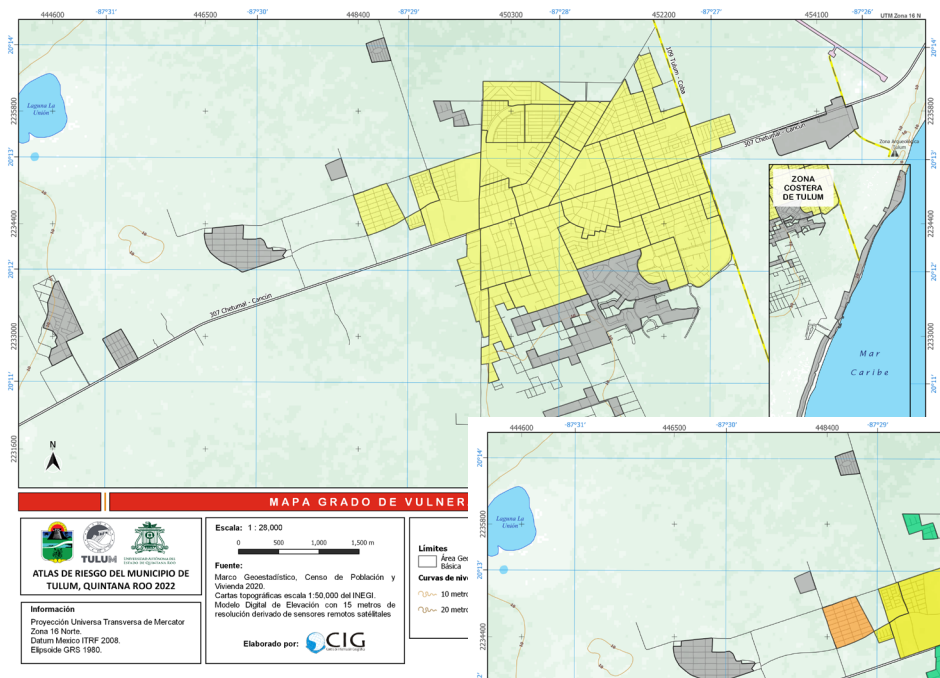
Los resultados se presentan visualmente en forma de una matriz de colores (consulte las Tablas 125 y 126), que clasifican cada una de las unidades de análisis (localidades, AGEBs y Manzanas) en cinco categorías de riesgo distintas: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto.

Tabla 125. Valores de clasificación del Riesgo por ciclones tropicales

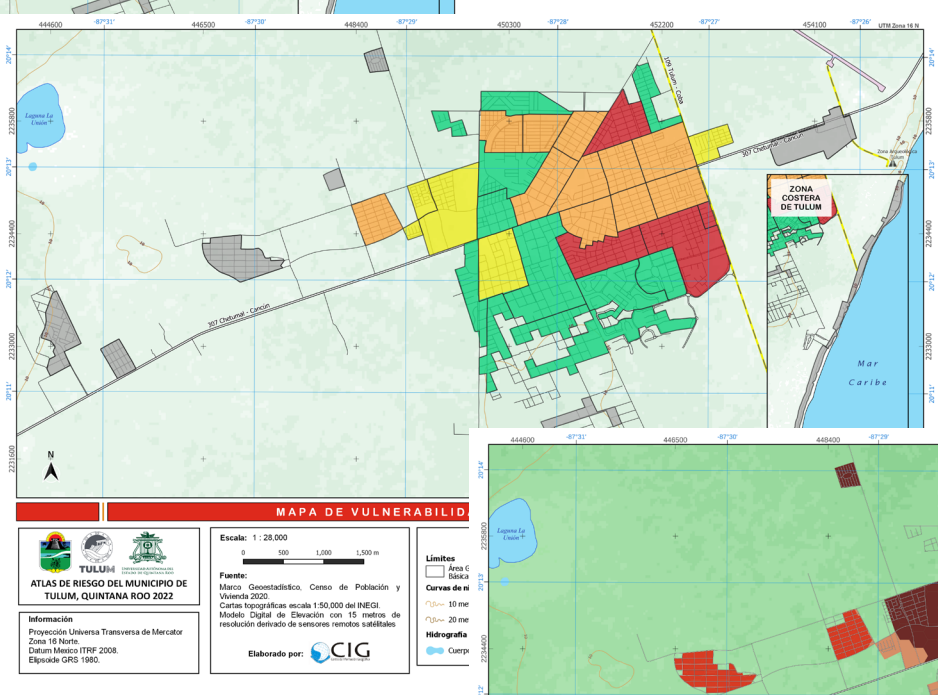
Valor	Simbología (color)
Muy bajo	
Bajo	
Medio	
Alto	
Muy alto	

Tabla 126. Matriz de clasificación de Riesgo por ciclones tropicales

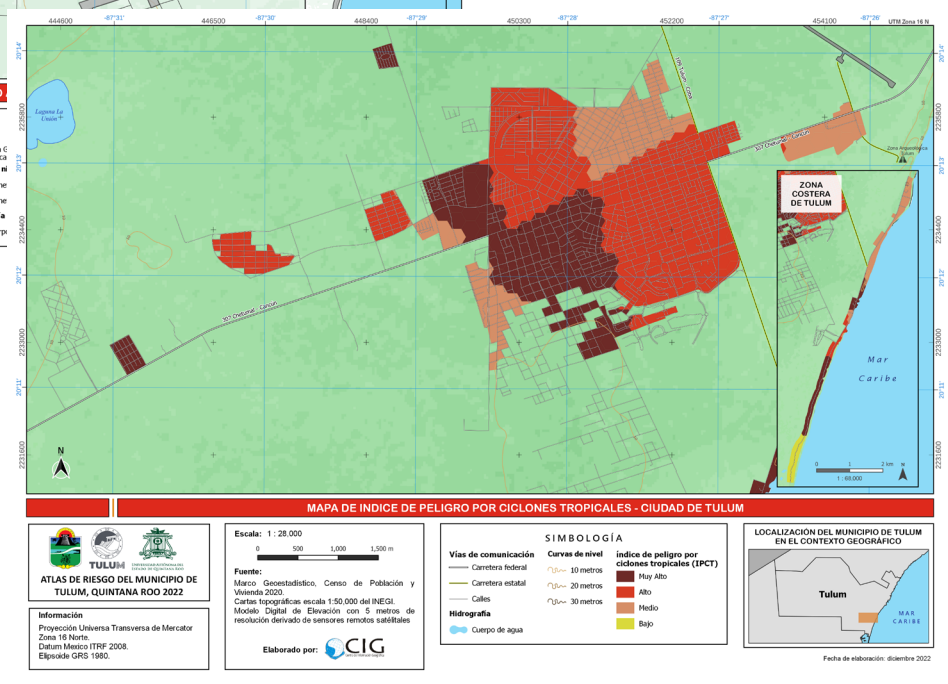
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Muy bajo					
Bajo					
Medio					
Alto					
Muy alto					



Vulnerabilidad social

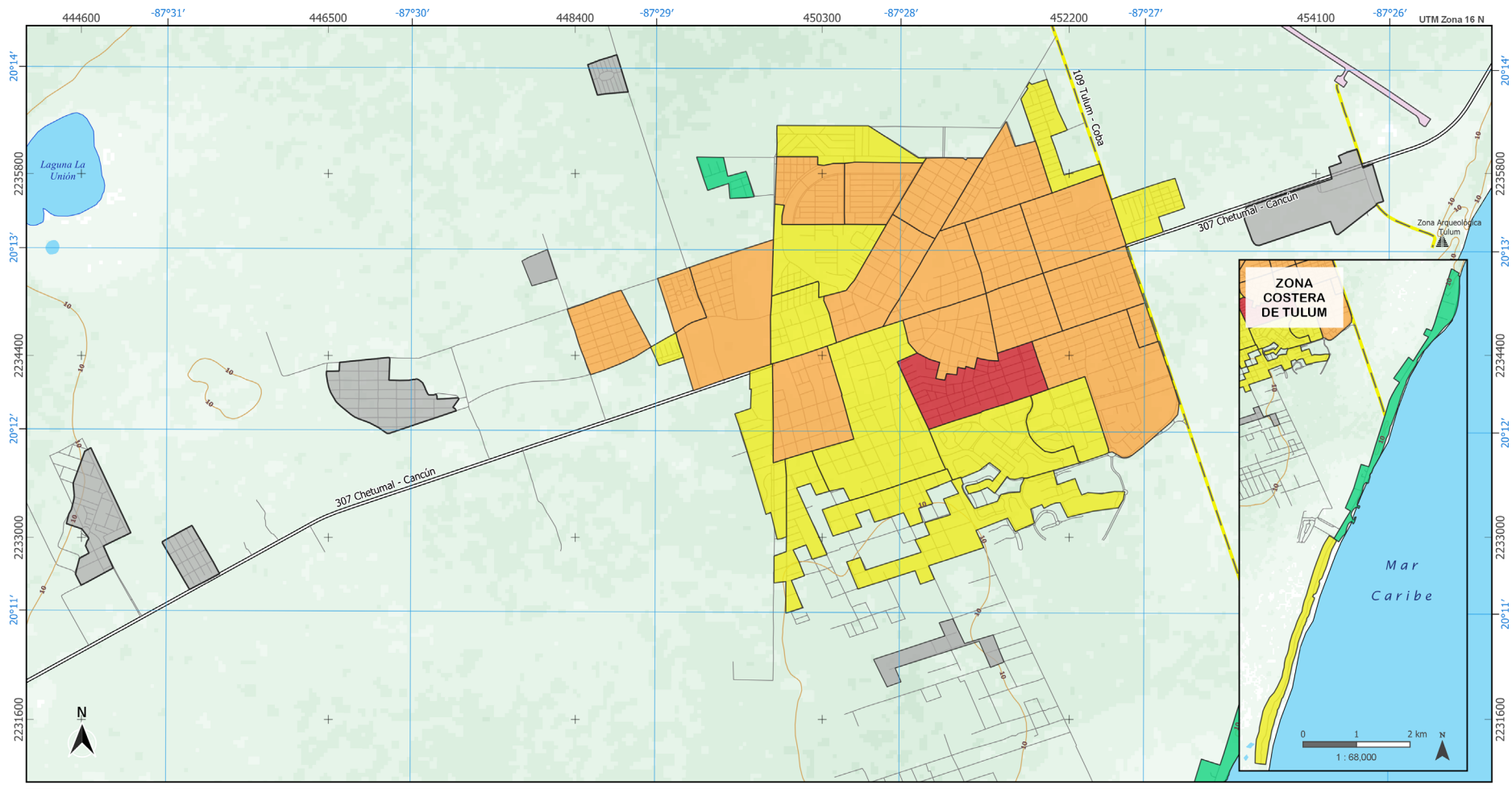


Vulnerabilidad física



Peligro por Ciclones tropicales

Figura 344. Mapa de Riesgo por ciclones tropicales para la ciula ciuda de Tulum



MAPA DE RIESGO POR CICLONES TROPICALES - CIUDAD DE TULUM

ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE TULUM, QUINTANA ROO 2022

Información
Proyección Universa Transversa de Mercator
Zona 16 Norte.
Datum Mexico ITRF 2008.
Elipsoide GRS 1980.

Escala: 1 : 28,000
0 500 1,000 1,500 m

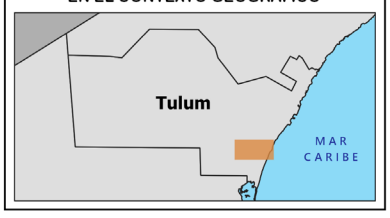
Fuente:
Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020.
Cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI.
Modelo Digital de Elevación con 15 metros de resolución derivado de sensores remotos satélitales

Elaborado por: CIG

SIMBOLOGÍA

Límites
Área Geoestadística Básica
Curvas de nivel
10 metros
20 metros
Hidrografía
Cuerpo de agua
Vías de comunicación
Carretera federal
Carretera estatal
Calles
Zona Arqueológica
Tulum
Riesgo por ciclones tropicales
Alto
Medio
Bajo
Muy bajo
Sin dato

LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE TULUM EN EL CONTEXTO GEOGRÁFICO



Fecha de elaboración: diciembre 2022

Fuente: Elaboración propia

A nivel localidad, se evaluó el riesgo de 50 localidades en el municipio, de las cuales 19 resultaron con peligro alto, 30 con peligro medio y 1 con peligro bajo. Resalta la ciudade de Tulum que resulta con peligro alto ante los ciclones tropicales.

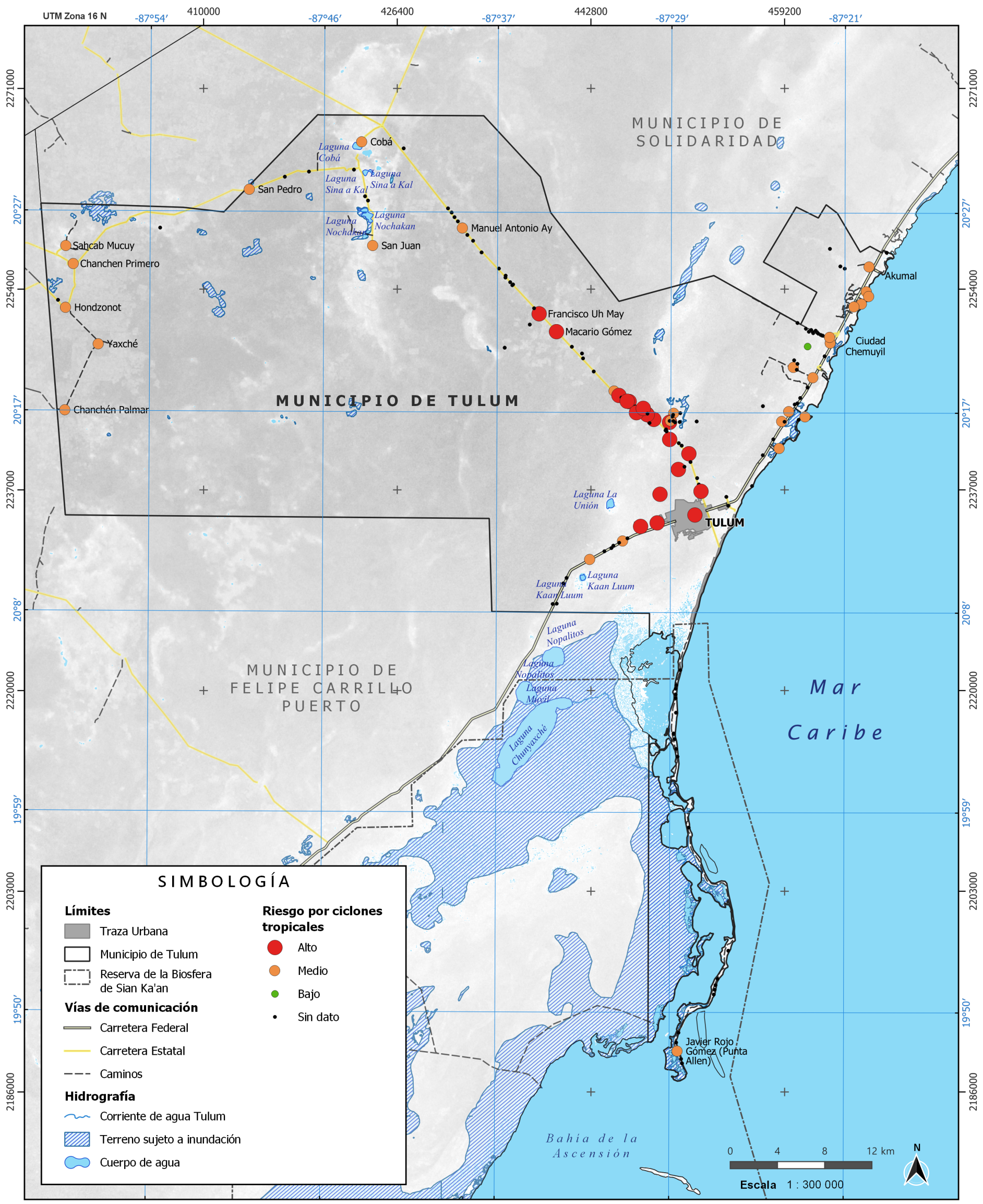
Tabla 127. Peligro por ciclones tropicales para localidades de Tulum.

Localidad	Grado de vulnerabilidad social	Grado de vulnerabilidad física	Grado de peligro	Grado de riesgo
Chanchen Primero	Bajo	Alto	Medio	Medio
Kirabo	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Tres Hermanos	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Yaxché	Bajo	Alto	Medio	Medio
Cenote Calavera	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
India Blanca	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
La Ceiba	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
La Unión	Muy bajo	Alto	Alto	Medio
La Unión	Muy bajo	Alto	Alto	Medio
Paraíso [Rancho]	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Cachito de Cielo	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Marités	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Kilómetro Doce	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Lum Ha [Lotes]	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Kilómetro Diez Punto Cinco	Muy bajo	Alto	Muy alto	Alto
Akumal Sur	Muy bajo	Bajo	Alto	Medio
El Pequeño Paraíso	Muy bajo	Bajo	Muy alto	Medio
Alfa y Mega	Muy bajo	Bajo	Muy alto	Medio
India Blanca	Muy bajo	Bajo	Muy alto	Medio
Punta Sur	Muy bajo	Bajo	Alto	Medio
Tulum	Bajo	Medio	Muy alto	Alto
Akumal	Bajo	Medio	Alto	Medio
Aventuras Akumal	Muy bajo	Medio	Alto	Medio
Bahías de Punta Solimán	Muy bajo	Medio	Alto	Medio
Balam Canché	Muy bajo	Medio	Alto	Medio
Cobá	Bajo	Medio	Medio	Medio
Las Dos Hermanas	Muy bajo	Medio	Muy alto	Alto
Dos Palmas	Muy bajo	Medio	Alto	Medio
Francisco Uh May	Bajo	Medio	Muy alto	Alto
Jacinto Pat	Muy bajo	Medio	Alto	Medio
Javier Rojo Gómez (P. Allen)	Bajo	Medio	Medio	Medio
Macario Gómez	Bajo	Medio	Muy alto	Alto
Manuel Antonio Ay	Bajo	Medio	Alto	Medio

Localidad	Grado de vulnerabilidad social	Grado de vulnerabilidad física	Grado de peligro	Grado de riesgo
Sahcab Mucuy	Bajo	Medio	Medio	Medio
San Juan	Bajo	Medio	Medio	Medio
Tankah Tres	Muy bajo	Medio	Alto	Mediow
Yolis	Muy bajo	Medio	Muy alto	Alto
Yax'muul [Rancho]	Muy bajo	Medio	Alto	Medio
Árboles Tulum	Muy bajo	Medio	Muy alto	Alto
Cristal [Colonia]	Muy bajo	Medio	Muy alto	Alto
Don Brígido	Muy bajo	Medio	Muy alto	Alto
Océano Azul	Muy bajo	Medio	Alto	Bajo
Chanchén Palmar	Bajo	Muy alto	Medio	Medio
Hondzonot	Bajo	Muy alto	Medio	Medio
San Pedro	Muy bajo	Muy alto	Medio	Medio
Gran Bahía Príncipe	Muy bajo	Muy bajo	Alto	Medio
Chan Chemuyil	Muy bajo	Muy bajo	Alto	Medio
Ciudad Chemuyil	Bajo	Muy bajo	Alto	Medio
Balam Luum	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	Medio
Cafeto Cimarrón	Muy bajo	Muy bajo	Muy alto	Medio

Fuente: Elaboración propia

Figura 346. Mapa de riesgo por ciclones para las localidades de Tulum|



Fuente: Elaboración propia

7.3. Riesgo por inundaciones

Ya se ha señalado que el riesgo de desastres es la probabilidad de experimentar pérdidas o daños, en el sistema afectable que incluye la infraestructura, las viviendas o la vida y la salud de la población en una localidad específica. Los dos factores que componen el riesgo son el peligro y la vulnerabilidad. Comprender y cuantificar las zonas con peligro de inundarse, evaluar la vulnerabilidad de la población y, en consecuencia, determinar los niveles de riesgo son pasos esenciales para establecer procedimientos y medidas efectivas de mitigación destinadas a reducir los efectos adversos de este tipo de amenazas y evitar la ocurrencia de desastres.

Para el municipio de Tulum, se llevaron a cabo dos niveles de análisis geográfico: uno a nivel de localidad y otro a nivel manzana de la ciudad de Tulum. Los escenarios de peligro relacionados con las inundaciones pluviales se evaluaron utilizando la metodología para el calculo del peligro por inundaciones pluviales, que se detalla en la sección ***5.3.9 Inundaciones por lluvias extremas*** de este Atlas. Esta metodología revela valores de peligro más altos en las áreas centrales del municipio, y cercanas a la ciudad de Tulum.

La vulnerabilidad social se describe en la sección ***6.1 Vulnerabilidad Social***, mientras que la vulnerabilidad física se aborda en la sección ***6.2 Vulnerabilidad Física*** de este mismo Atlas. Ambos tipos de vulnerabilidad representan la susceptibilidad del sistema a sufrir daños y se expresan en cinco categorías: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta.

Para calcular el riesgo asociado a las inundaciones pluviales, se optó por utilizar las misma metodología utilizada en el cálculo del riesgo por ciclones tropicales, que se basa en el sobreposicionamiento de capas de peligros y vulnerabilidad utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG). La combinación de estos factores permitió obtener un indicador que estima el nivel de riesgo.

La interpretación de los resultados de este análisis se realizó mediante la estandarización y homologación de bases de datos, la utilización de la metodologia de CENAPRED basada en modelos matemáticos para calcular el peligro por inundaciones pluviales y los indicadores de vulnerabilidad, además de ponderaciones cualitativas para los niveles de riesgo presentados.

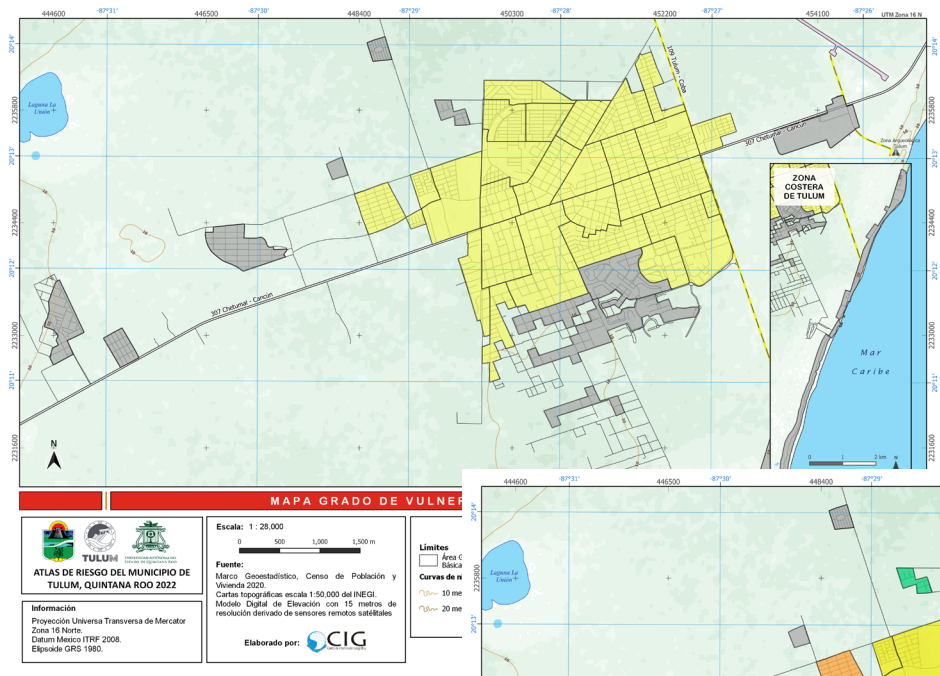
Los resultados se presentan visualmente en forma de una matriz de colores (consulte las Tablas 128 y 129), que clasifican cada una de las unidades de análisis (localidades, AGEBs y Manzanas) en cinco categorías de riesgo diferentes: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto.

Tabla 128. Valores de clasificación del Riesgo por inundación

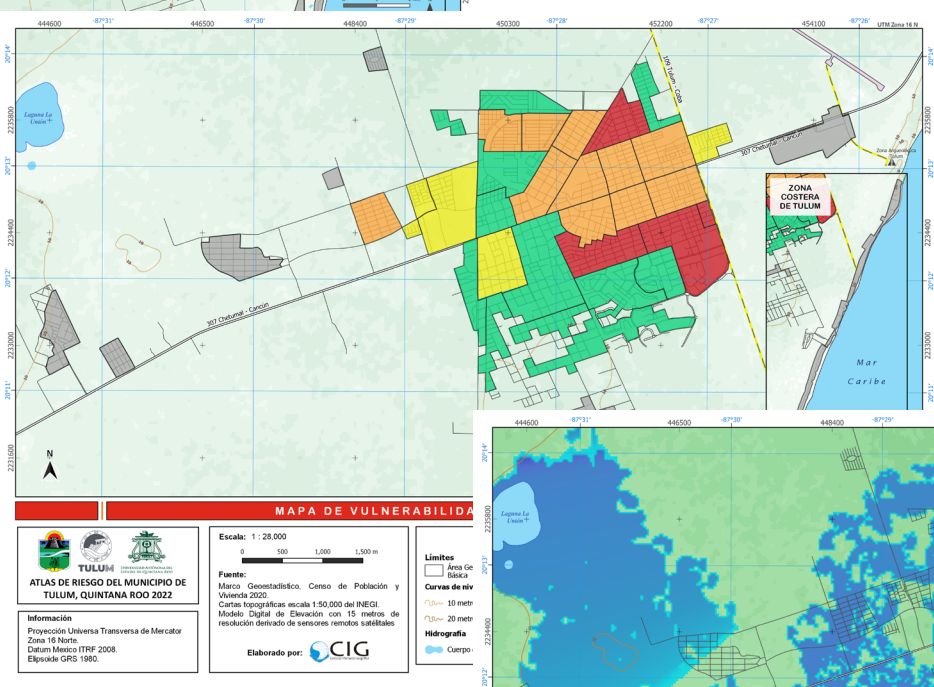
Valor	Simbología (color)
Muy bajo	
Bajo	
Medio	
Alto	
Muy alto	

Tabla 129. Matriz de clasificación de Riesgo

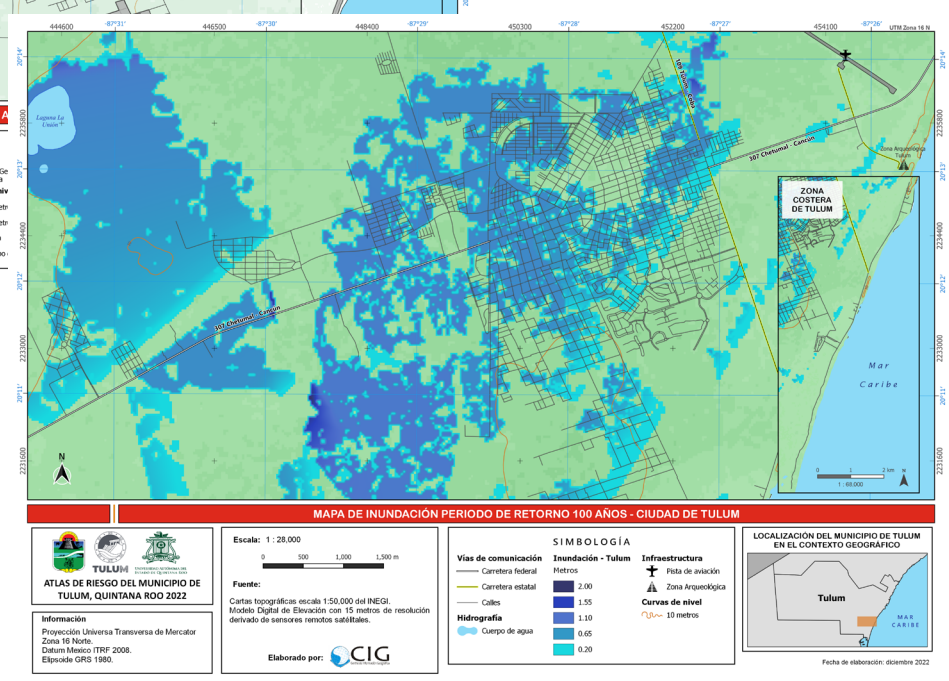
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Muy bajo					
Bajo					
Medio					
Alto					
Muy alto					



Vulnerabilidad social

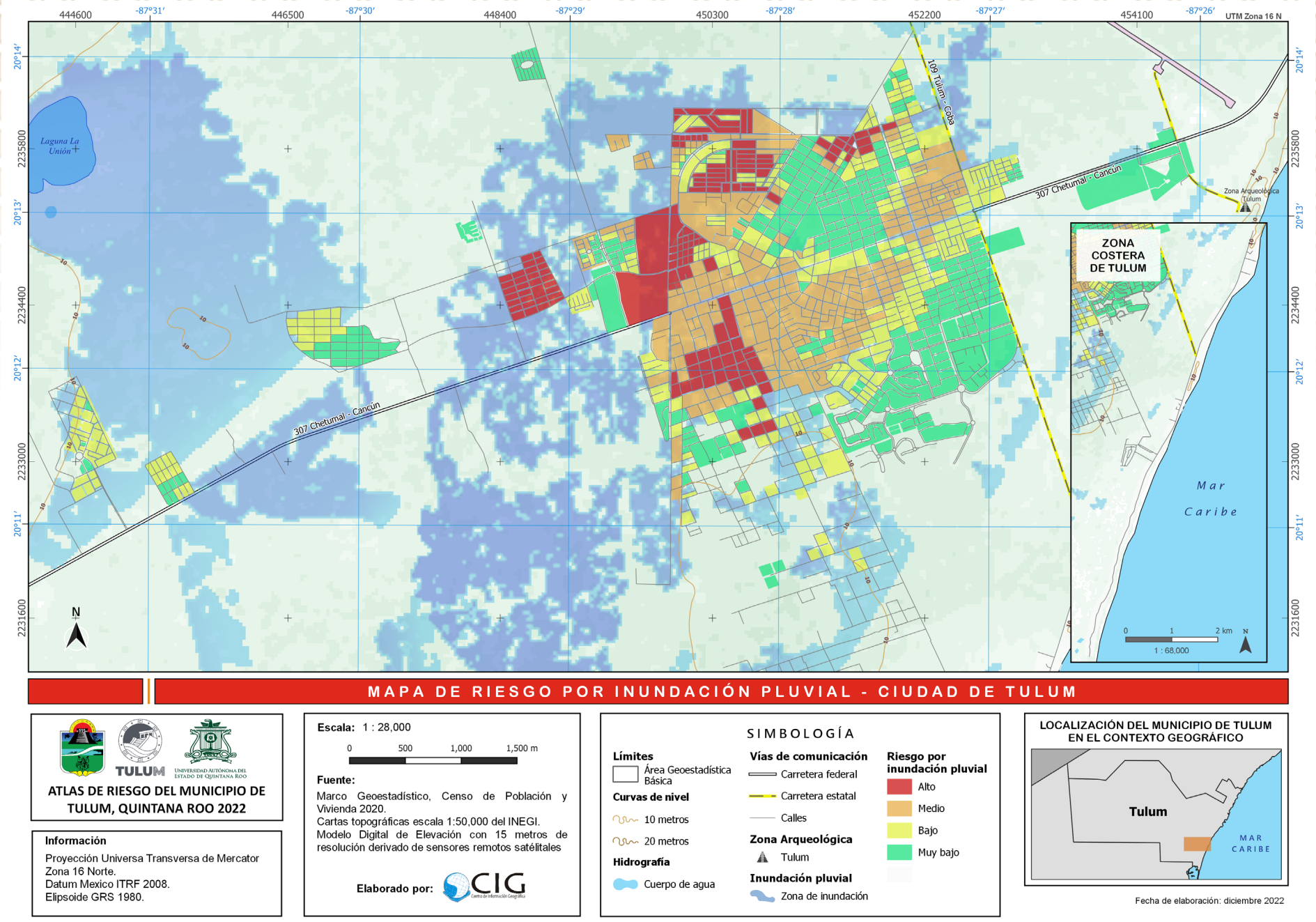


Vulnerabilidad física



Peligro por inundaciones pluviales

Figura 347. Riesgpo por inundaciones pluviales para la ciudad de Tulum



Fuente: Elaboración propia

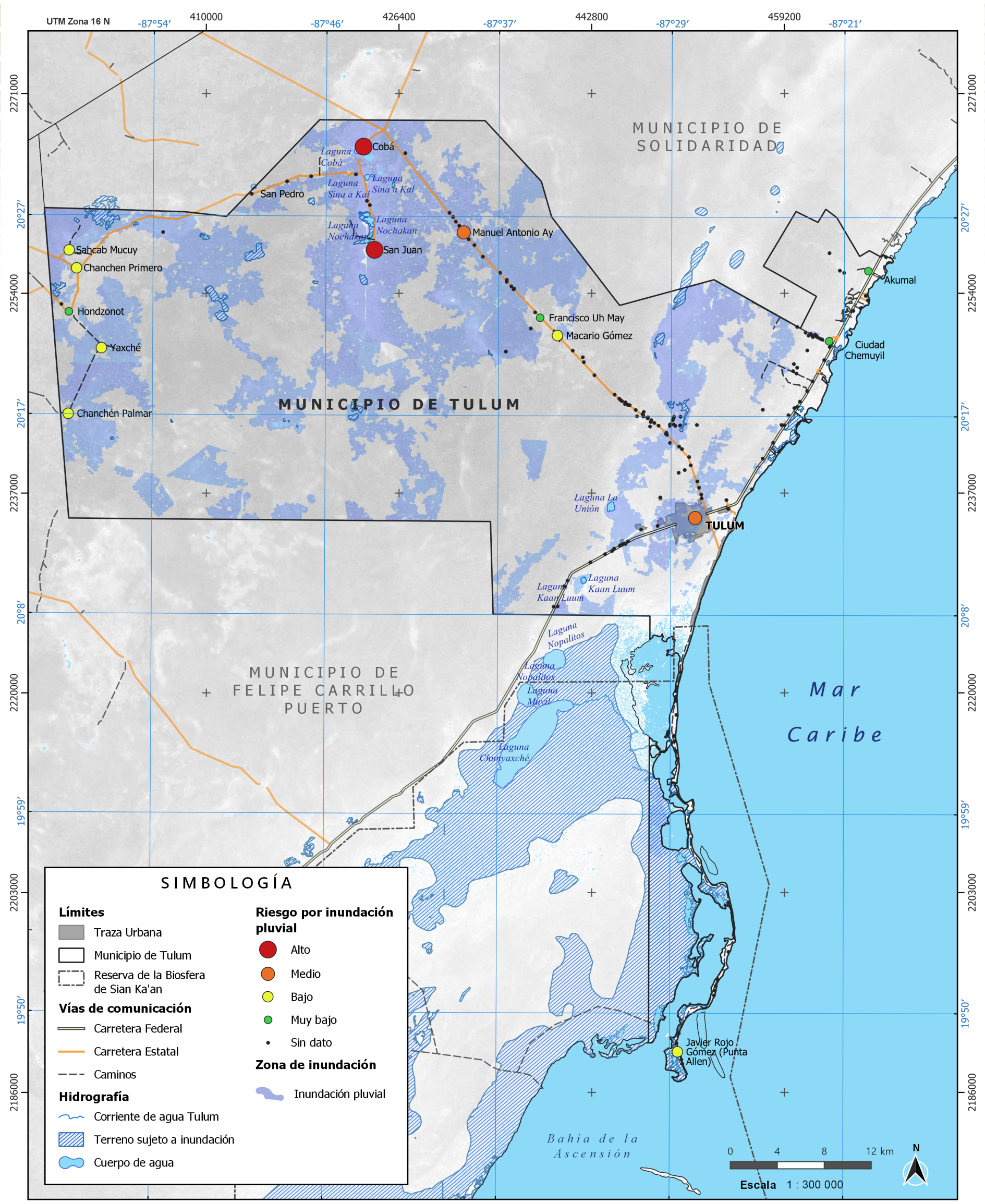
Debido a la naturaleza de esta amenaza se tiene un mayor tiempo de reacción por parte de las personas, sin embargo, muchas veces se pierde el patrimonio familiar o se deterioran las viviendas. A nivel localidad se lograron evaluar 15 localidades que se encuentran en un área con peligro de inundación, de las cuales 4 tienen un riesgo Muy bajo, 6 un riesgo bajo, 2 un riesgo medio y 2 un riesgo alto. Dentro de esta última categoria resalta la ciudad de Tulum que como puede observarse en la figura 344 tiene la mayoria de sus áreas con peligro de inundación al norponiente de la ciudad.

Tabla 130. Peligro por ciclones tropicales para localidades de Tulum.

Localidad	Grado de vulnerabilidad social	Grado de vulnerabilidad física	Grado de peligro	Grado de riesgo
Chanchen Primero	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
Yaxché	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
Tulum	Bajo	Medio	Medio	Medio
Akumal	Bajo	Medio	Muy bajo	Muy bajo
Cobá	Bajo	Medio	Alto	Alto
Francisco Uh May*	Bajo	Medio	Muy bajo	Muy bajo
Javier Rojo Gómez (P. Allen)	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Macario Gómez*	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Manuel Antonio Ay	Bajo	Medio	Medio	Medio
Sahcab Mucuy	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
San Juan	Bajo	Medio	Alto	Alto
Chanchén Palmar	Bajo	Muy alto	Bajo	Bajo
Hondzonot	Bajo	Muy alto	Muy bajo	Muy bajo
Ciudad Chemuyil	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo

Fuente: Elaboración propia

Figura 348. Riespo por inundaciones pluviales para las localidades del municipio de Tulum



Fuente: Elaboración propia

Fase V
Propuesta de estudios, obras o acciones

8. FASE V. PROPUESTA DE ESTUDIOS, OBRAS O ACCIONES.

El Marco de Sendai instaló el concepto de riesgo sistémico, el cual implica reconocer la existencia de factores institucionales, socioeconómicos, culturales y territoriales, que condicionan la vulnerabilidad y condiciones de riesgo. Por lo tanto, aunque la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) se ha convertido en un tema relevante para el desarrollo y la seguridad pública de ciudades, implementar políticas adecuadas para personas es una tarea muy difícil.

La planificación urbana y la GRD están vinculadas a acuerdos internacionales y políticas nacionales. La ONU, a través de la UNISDR en el año 2010, propuso como parte esencial para reducir los problemas que surgen cuando ocurren desastres. Por lo tanto, se debe incorporar "en los criterios de planificación territorial el enfoque de reducción de riesgos a desastres" (UNISDR, 2010).

Las medidas de mitigación pueden clasificarse en estructurales y no estructurales. Las medidas no estructurales consisten en políticas y prácticas de desarrollo que están diseñadas para evitar el riesgo (OEA, 1993).

- Uso de suelo
- Alertas
- Concientización publica
- Educación

Las medidas estructurales por su parte consisten en:

- Códigos de construcción para el diseño edificaciones, métodos y materiales
- Construcción de rompeolas
- Bardas de contención para marea de tormenta
- Líneas de árboles
- Restauración de línea de manglares
- Restauración de dunas

Con base a la información generada a partir del análisis de peligros, vulnerabilidad y riesgos, trabajo de campo, percepción de la población, capacidad de respuesta y conocimiento de los concepto y acciones de la Gestión Integral de Riesgo de Desastre (GIRD) de las autoridades, así como la asesoría y acompañamiento de la Dirección de Protección Civil y otra Dependencias de la Administración municipal se proponen las obras de carácter estructural y no estructural encaminadas a prevenir, minimizar o mitigar los efectos adversos producidos por la ocurrencia de algún fenómeno natural.

8.1. Planteamiento de propuestas

A partir de los fenómenos con mayor incidencia en el municipio de Tulum, se establecen las siguientes propuestas:

Hundimientos

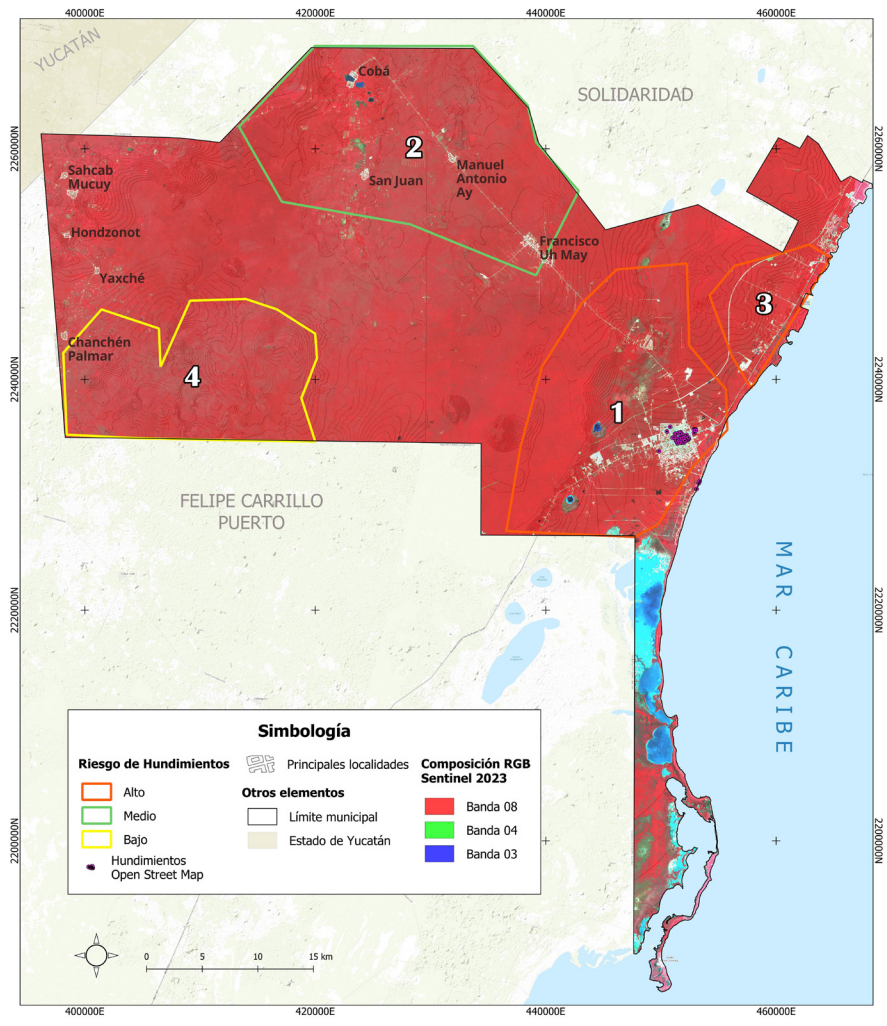
Los suelos kársticos son vulnerables por su misma naturaleza a los hundimientos, ya que uno de los factores que lo propician es la existencia de cavernas y oquedades en el interior de la superficie terrestre, formadas por la disolución de las rocas. Con el paso del tiempo, la parte superior (techo) de una cueva puede agrietarse o colapsar, absorbiendo materiales y elementos suprayacentes en su interior, provocando diversos tipos de daños. En el municipio de Tulum se identificaron 4 zonas de riesgo para la amenaza de hundimientos (figura 349). Muchas de las construcciones (edificios y viviendas), han sido construidas sin tomar en cuenta la aplicación de normas de construcción. La vulnerabilidad que se tiene ante estas amenazas engloba la relación hombre-estructura-vulnerabilidad-hábitat, lo que se traduce como vulnerabilidad estructural (Aguilar-Velázquez, 2022).

La de mayor riesgo es la zona donde se encuentra la ciudad de Tulum la mayor urbanizada, por consiguiente, se identificaron mayores casos, principalmente con la información generada a través del proyecto Co.Mapper Tulum, concentrados y coincidentes con la zona de mayor riesgo del municipio. Las autoridades encargadas de otorgar los permisos de uso de suelo deben tener en consideración:

Propuestas/Acciones

- Antes de la edificación de infraestructura o viviendas se debe estudios de mecánica de suelo, análisis estructurales, considerando los códigos de construcción para el área y la altitud máxima de pisos establecido.
- Realizar inventario de elementos geológicos, específicamente de morfología kárstica, identificando su uso, incluyendo los particulares.
- Preservación de la calidad de los recursos acuíferos subterráneos, respetando sus caudales naturales.
- Capacitación, divulgación y sensibilización de la población para elevar la percepción del riesgo y de servir como referente para otras investigaciones.
- Valoración de la vulnerabilidad estructural para una mejor gestión de riesgos a nivel local.

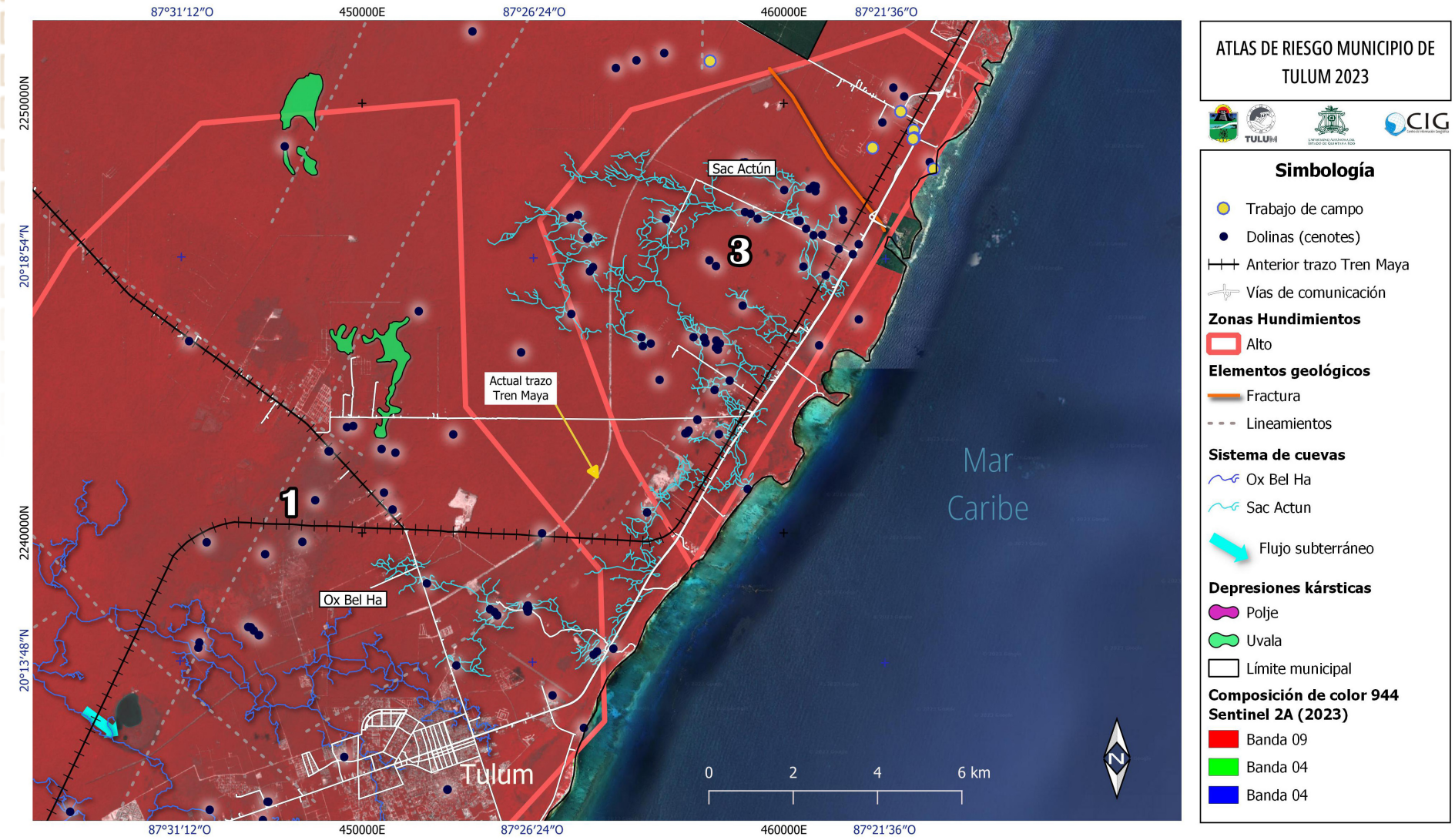
Figura 349. Estudio de riesgo de hundimientos



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, también se debe tener en cuenta la ruta (trazo) actual del Tren Maya, tanto el tramo 5 y 6, que cruzan el territorio de Tulum, ya que como se puede observar en la figura 342 se localiza sobre los sistemas de cuevas. Lo anterior puede producir colapsos por vibración, ya que existen cuevas, cenotes y ríos subterráneos debajo del trazo. Los cenotes dentro del sistema Sac Actún o conexos ya presentan obstrucción en su flujo natural y agua turbia (figura 350). En trabajo se observó, la colocación de tubería con diámetros muy grandes que para su colocación significa perforaciones profundas al subsuelo, hay que tener en cuenta que en el territorio del municipio a solo 25 cm podremos encontrar agua, por lo que no se consideran adecuados para las características del suelo (figura 350). De la misma manera, se debe tener en cuenta que los cenotes (dolinas) también proveen de agua potable a las poblaciones, lo que implica el cuidado de estos sistemas naturales (figura 351). Se recomienda examinar la manifestación de impacto ambiental, estudios de mecánica de suelo y estudios geológicos, ante de cualquier permiso de desarrollo de infraestructura.

Figura 350. Relación espacial entre el trazo Tren Maya y acuíferos kársticos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 351. Obstrucción de flujos de agua subterráneos.



Fuente: Trabajo de campo.

Figura 352. Sistema de captación de agua potable, Chemuyil.



Fuente: Trabajo de campo.

Ciclones tropicales

La amenaza de ciclones tropicales es una de las más frecuentes en toda el área del Caribe Mexicano, por lo que es una de las más importantes de tener en cuenta para el municipio de Tulum, principalmente para los asentamientos localizados en su litoral. El mayor peligro de los ciclones tropicales son la combinación de factores que lo integran: elevación del nivel del mar, vientos violentos y fuertes precipitaciones. Se debe tener en cuenta que la temporada en que se presentan estos fenómenos abarca un periodo de seis meses cada año, iniciando oficialmente el 1 de junio y termina el 30 de noviembre para el Océano Atlántico, siendo los meses de agosto, septiembre y octubre cuando se registran más eventos ciclónicos.

El territorio del municipio de Tulum ha sufrido el paso de 12 Depresiones Tropicales (DT); 27 Tormentas Tropicales (TT); 8 Huracanes categoría 1 (H1); 1 Huracán categoría 2 (H2); 6 Huracanes categoría 3 (H3); 3 Huracanes categoría 4 (H4) y 1 Huracán categoría 5 (H5), dando un total de 58 fenómenos entre 1951 a 2022. Lo que indica una incidencia alta de esta amenaza para el municipio.

Entre las propuestas y acciones que se pueden referir para la mitigación de esta amenaza se encuentran las siguientes:

Propuestas/Acciones

- Reparar infraestructura dañada al paso de estos fenómenos porque sino estas quedan vulnerables y se convierten en peligro latente para la población que vive en esas localidades. Ejemplo de esto es el domo de la localidad de Cobá, que desde el paso del huracán Grace (2021) quedo dañado por sus vientos y no ha sido reparado (figura 353).

Figura 353. Domo localidad de Cobá, Tulum.



Fuente: Trabajo de campo.

- Revisión de códigos de edificación de infraestructura o viviendas (reglamentos de construcción: paredes, pisos y techos, y niveles de altura permitidos), y en su caso actualizarlos ante fenómenos hidrometeorológicos, principalmente ciclones tropicales e inundaciones (figura 354).

Figura 354. Expansión de construcciones cerca de la zona costera de la ciudad de Tulum





Fuente: Trabajo de campo.

- Supervisión de materiales de construcción ante vientos de huracán, paredes y techos, al dar los permisos de uso de suelo (figura 355).

Figura 355. Edificación de nuevas infraestructuras, ciudad de Tulum.



Fuente: Trabajo de campo.

- Verificar el control y normatividad de anuncios espectaculares en la vía federal y al interior de las localidades, principalmente en la ciudad de Tulum, y que cuenten con un plan de prevención en caso de huracanes (figura 348).

Figura 356. Espectaculares



Fuente: Tomada de: http://www.onemarketing.mx/espectaculares/quintana-roo/QTR012S1.php

- Emisión de Sistemas de Alertas Temprana (SAT) a través de esfuerzos bien organizados para implementar medidas preventivas apropiadas, teniendo en cuenta la conciencia pública sobre el peligro y su difusión de advertencias oportunas. Al ser el municipio un punto turístico se debe pensar que las alertas de prevención se emitan en diferentes idiomas y lengua maya.

- Construcción de infraestructura critica, como escuelas y hospitales de acuerdo con las normas de diseño adecuadas, que puedan resistir los vientos de fuerza huracanada que predominan en el momento de la emergencia.

- La zona costera del municipio se ha desarrollado a insuficiente distancia de la línea de costa. Se debe marcar hasta donde llegaría la marea de tormenta de acuerdo con la categoría del huracán y velocidad de vientos, ya que el sector hotelero o de servicios turísticos localizados en esa área se arriesga a ser dañado por acción de las olas y mareas de tormenta (figura 357).

- Se debe planear y socializar, campañas de educación ambiental el proceso normal de formación de playas y la importancia de la estabilización de dunas, ya que sin esto se va reduciendo la efectividad de un sistema natural de protección contra la acción de las olas (figura 357).

Figura 357. Edificaciones turísticas cercanas al litoral



Fuente: Trabajo de campo,

- Instalación de muros de contención en la zona hotelera para minimizar daños, erosión de playas, inundaciones o deslaves por marea de tormenta, en caso de huracán. Sin embargo, depresiones y tormentas tropicales por encontrarse a nivel del mar por el tipo de morfología de la costa, ver figura 358.

Figura 358. Vías de comunicación en el litoral de la zona costera Tulum



Fuente: Fotos de Trabajo de campo.

Uno de los pasos para mitigar los efectos de los ciclones tropicales se da a través de esfuerzos bien organizados para implementar medidas preventivas apropiadas, teniendo en cuenta la conciencia pública sobre el peligro y la emisión de advertencias oportunas. Para alcanzar mayores niveles de prevención de las consecuencias de estas amenazas, se recomienda:

1. Recolectar los datos meteorológicos confiables para cada evento, que van desde estudios técnicos hasta noticias periodísticas.

2. Con toda la información, bien ordenada, se debe llevar a cabo un estudio y la creación de una Base de Datos histórica para el municipio, que se integre con:

    a. Distribución de la amenaza de ocurrencia por mes por año

    b. La frecuencia de la fuerza de los vientos y su dirección

    c. La frecuencia de marea de tormentas, la altura alcanzada por segmento costero

    d. La frecuencia de inundación

    e. Apoyar las estrategias de planeación a partir de la información generada.

EJEMPLOS DE ACCIÓN COMUNITARIA:

Las acciones que pueden realizarse desde las comunidades para reducir su vulnerabilidad ante ciclones tropicales son específicamente no estructurales, de monitoreo y mantenimiento (OEA, 1993):

- Evitar tirar basura en lagunas, cenotes, específicamente residuos de manejo especial y voluminoso (llantas, colchones, ramas de árboles), ya que se acumulan y se vuelven obstáculos para los flujos normales de agua, superficial como subterránea.

- No cortar vegetación natural en los bordes de cuerpos de agua, litoral para evitar erosión del suelo.

- Limpieza de alcantarillas, no tirar objetos que puedan obstruir infraestructura de drenaje.

- No retirar piedras ni arena de las playas

- Poda de árboles, para mantener alejadas a las ramas de líneas de electricidad y telefónicas.

- Mantener postes de electricidad y teléfono en buenas condiciones, sino reportarlo.

- Informar señales de deterioro en edificaciones públicas, principalmente las que operan como refugios temporales.

Inundaciones

Como se ha señalado, anteriormente, las inundaciones pluviales son eventos en los que el agua de lluvia acumulada supera la capacidad de drenaje de un área determinada. Las inundaciones son el desastre natural más común que puede afectar a las personas, la infraestructura y el medio ambiente natural. Es imposible definir con precisión todo el potencial de inundación en un área determinada. Aparte de los datos históricos, la evidencia más obvia del potencial de inundaciones a gran escala es la identificación de llanuras aluviales, que generalmente pueden identificarse a partir de imágenes procesadas de forma remota. Por tal motivo, se una de las propuestas vinculadas a esta amenaza es:

Propuestas/Acciones

- El uso de la percepción remota para la planificación del crecimiento urbano como alternativa de costo y tiempo mínimo.

- Capacitación en el uso imágenes de satélite para la evaluación de peligros naturales de inundación que tengan como resultado:

    - Mapas de demarcación de las llanuras de inundación, clasificación del uso de suelo,

    - Datos históricos

    - Humedad del suelo

- Resolución espacial de 20 m para rasgos detallados (edificaciones, vías de comunicación, infraestructura crítica, entre otros).

- Resolución de 30-80m uso de tierra

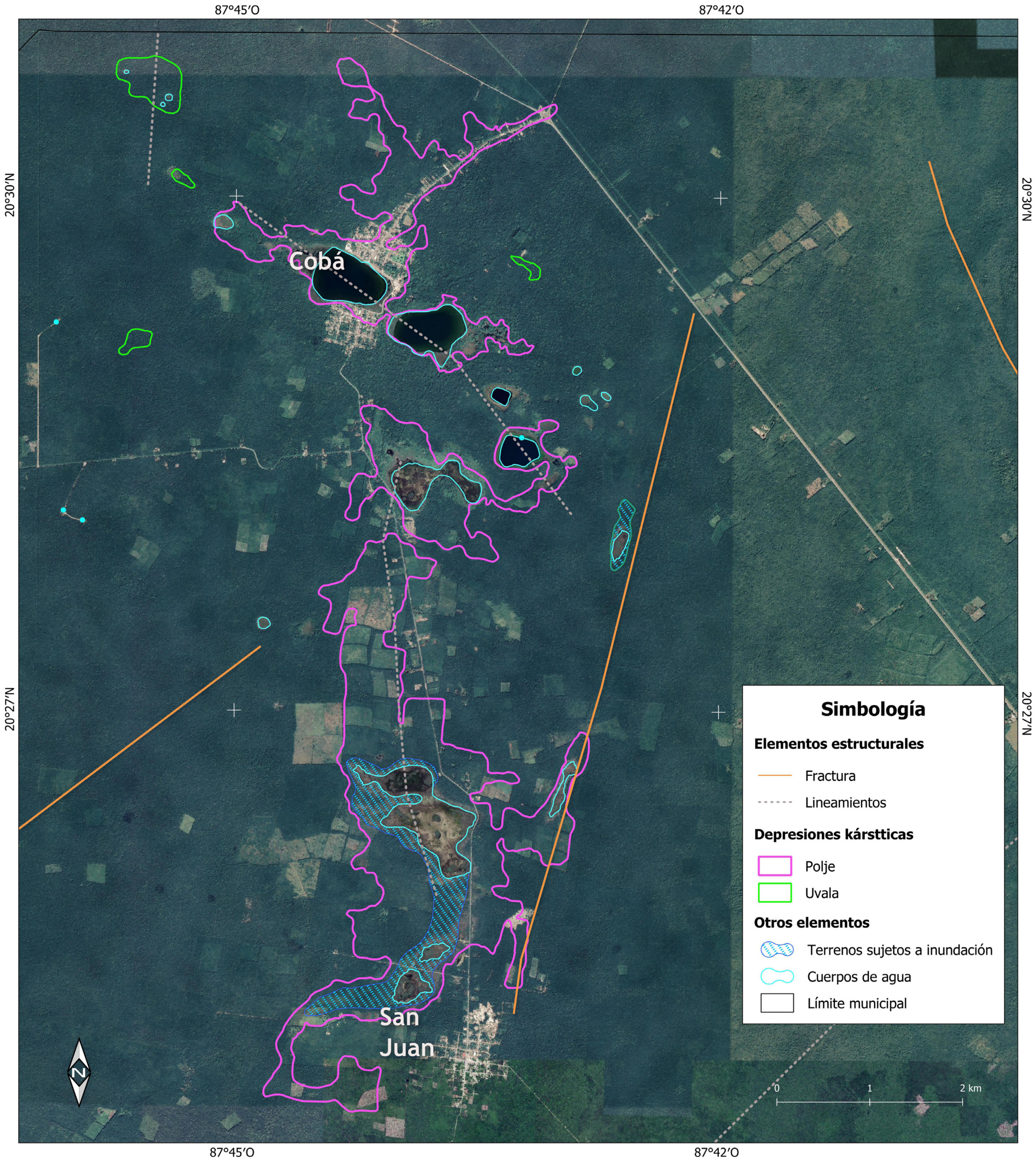
- Resolución de 1km para humedad de suelo y datos climáticos

- Cobertura de áreas grandes

Caso de estudio: Cobá

Una de las localidades en el municipio de Tulum que más afectaciones ha tenido a raíz de inundaciones pluviales es Cobá. En esta localidad se identifica suelos Gleysol y Litosoles, el primero, específico de humedales y que bajo condiciones naturales están afectados por agua subterránea en los primeros 50 m de profundidad. El segundo, representa suelos con menos de 25 cm de espesor, susceptibles a la erosión. Ambos relacionados con roca caliza-coquina. Estas características hacen que Cobá sea más susceptibles a las inundaciones (figura 359). Ya que, además, se encuentra sobre depresiones de roca kárstica, principalmente poljés, de grandes dimensiones a modo de valle alargado, y a mayor distancia uvalas (figura 359). A su interior se localizan estructuras kársticas como dolinas (cenotes) y cuevas, así como acuíferos (lagunas). Al mismo tiempo, se observan la acumulación de sedimentos de origen lacustre.

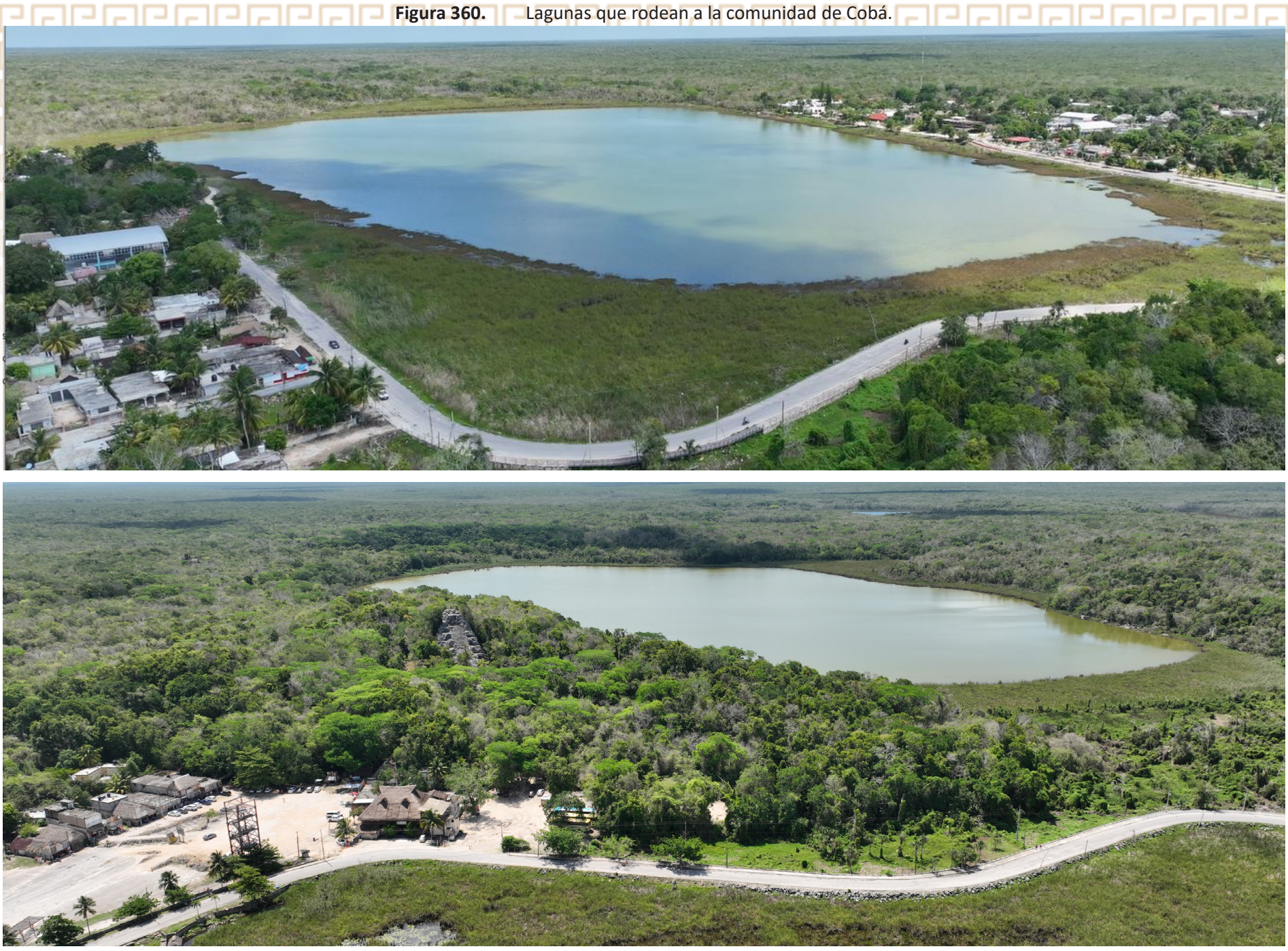
Figura 359. Susceptibilidad a inundación: Cobá



Fuente: Elaboración propia

La composición del suelo y los cuerpos lagunares que rodea esta comunidad son factores que elevan el riesgo a inundaciones. Estas lagunas llegan a desbordarse con precipitaciones intensas (figura 359 y figura 360), principalmente las producidas por fenómenos hidrometeorológicos como depresiones tropicales, tormentas y ciclones tropicales, las cuales pueden dañar vías de comunicación y dejar incomunicadas localidades al oriente del municipio, ya que es su única vía de acceso.

Figura 360. Lagunas que rodean a la comunidad de Cobá.



Fuente: Trabajo de campo.

La población de esta comunidad señala que el área de estacionamiento de la zona arqueológica siempre sufre encharcamientos. No obstante, después de la última inundación (2021) esta área fue rellenada como una solución provisional, ya que la mayor parte de sus ingresos provienen de la derrama que dejan los turistas al visitar este sitio (figura 361). Entre sus propuestas señalan que es necesario que se realice un plan integral de prevención y mitigación contra inundaciones pluviales recurrentes cada año. Se observó, en la visita a la localidad de Cobá que solo se cuenta con barreras de protección de plástico, las cuales en el momento de lluvia fuerte y viento éstas son arrastradas sobre la vía lo cual también puede provocar accidentes a los conductores (figura 361).

Figura 361. Área de estacionamiento zona arqueológica Cobá.



Fuente: Trabajo de campo

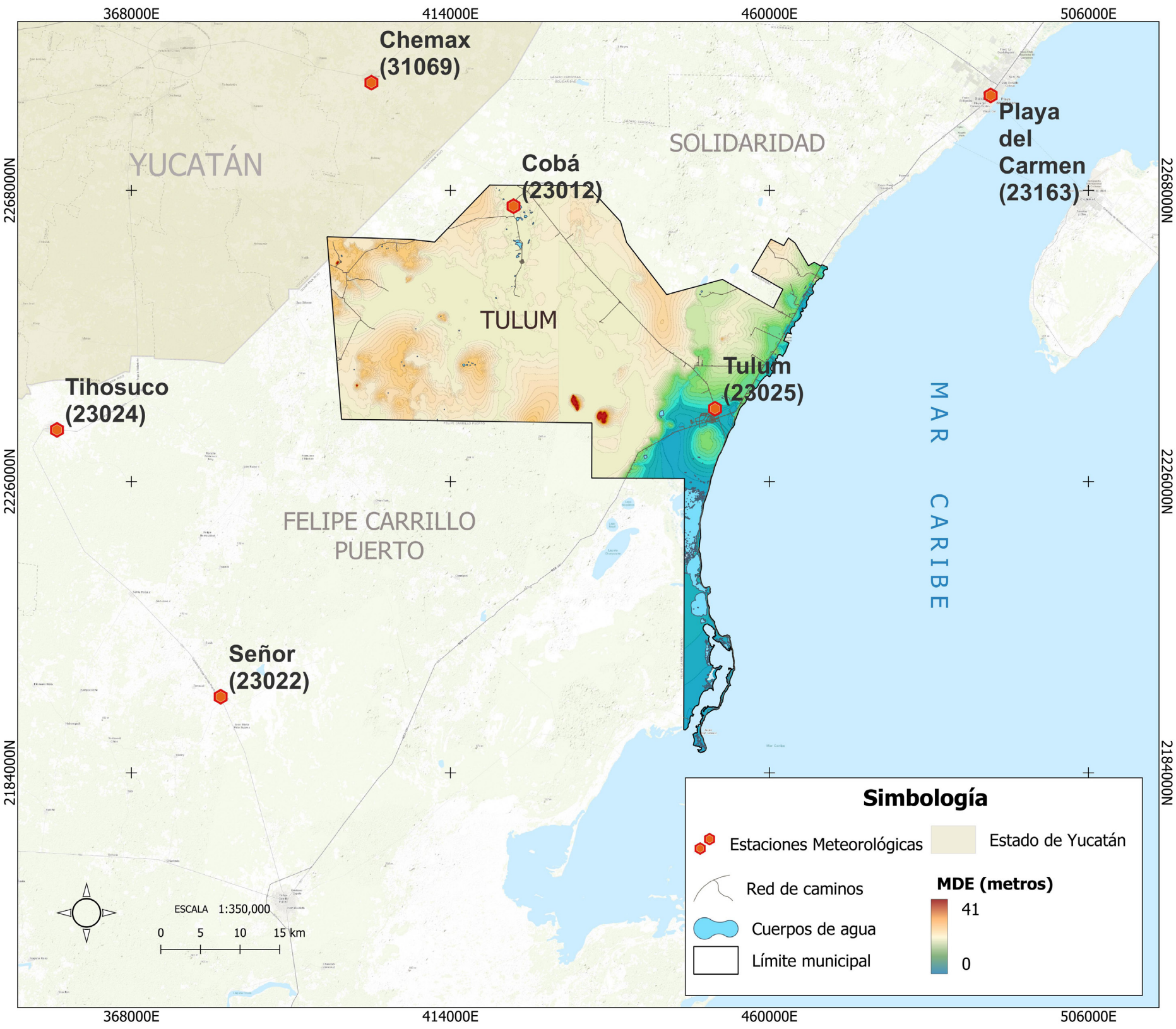
Medidas no estructurales contra inundaciones

- Instrumentación de sistemas de monitoreo de variables hidrometeorológicas. La falta de estaciones meteorológicas (solo se tiene identificadas por CONAGUA 2 estaciones) complica la obtención de datos fiables para realizar escenarios de prevención efectivos para el municipio de Tulum, por lo que se tuvo que utilizar estaciones correspondientes a otros municipios (figura 362).
- El sistema de monitoreo hidrometeorológico requiere de la instalación de estaciones automáticas y telemétricas para la captación de los datos de precipitación en tiempo real, los cuales se transmiten a una estación central que reporta a las instituciones encargadas de dar las señales de alerta a la población
- Desarrollo de Sistemas de Alertas Tempranas para inundaciones (SAT) para aviso a la población.
- Elaboración de planes de contingencia y evacuación de la población.
- La implementación de un SAT requiere de la definición de los umbrales de lluvia o valores críticos que pueden generar las precipitaciones.

Medidas estructurales contra inundaciones

- Construcción de obras hidráulicas (bardas de contención, diques, obras de control, pozos de absorción y retención de sedimentos o basura)
- Construcción de obras de conducción de flujos (canalizaciones)
- Reforestación, el mantener la cobertura vegetal puede ayudar a almacenar parte del volumen de agua precipitado y reducir la velocidad de escurrimiento superficial.
- Control de erosión del suelo, vinculado con el punto anterior, puede ser realizado por la reforestación, pequeños reservorios, estabilización de las orillas y prácticas agrícolas correctas.

Figura 362. Falta de sistemas de instrumentación en el municipio Tulum



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el control de las inundaciones se obtiene por una combinación de medidas estructurales y no estructurales que permitan minimizar las pérdidas y salvaguardar vidas. Las acciones de mitigación deben incluir medidas de ingeniería y un plan de protección contra la inundación y sus efectos, así como su socialización con la población.

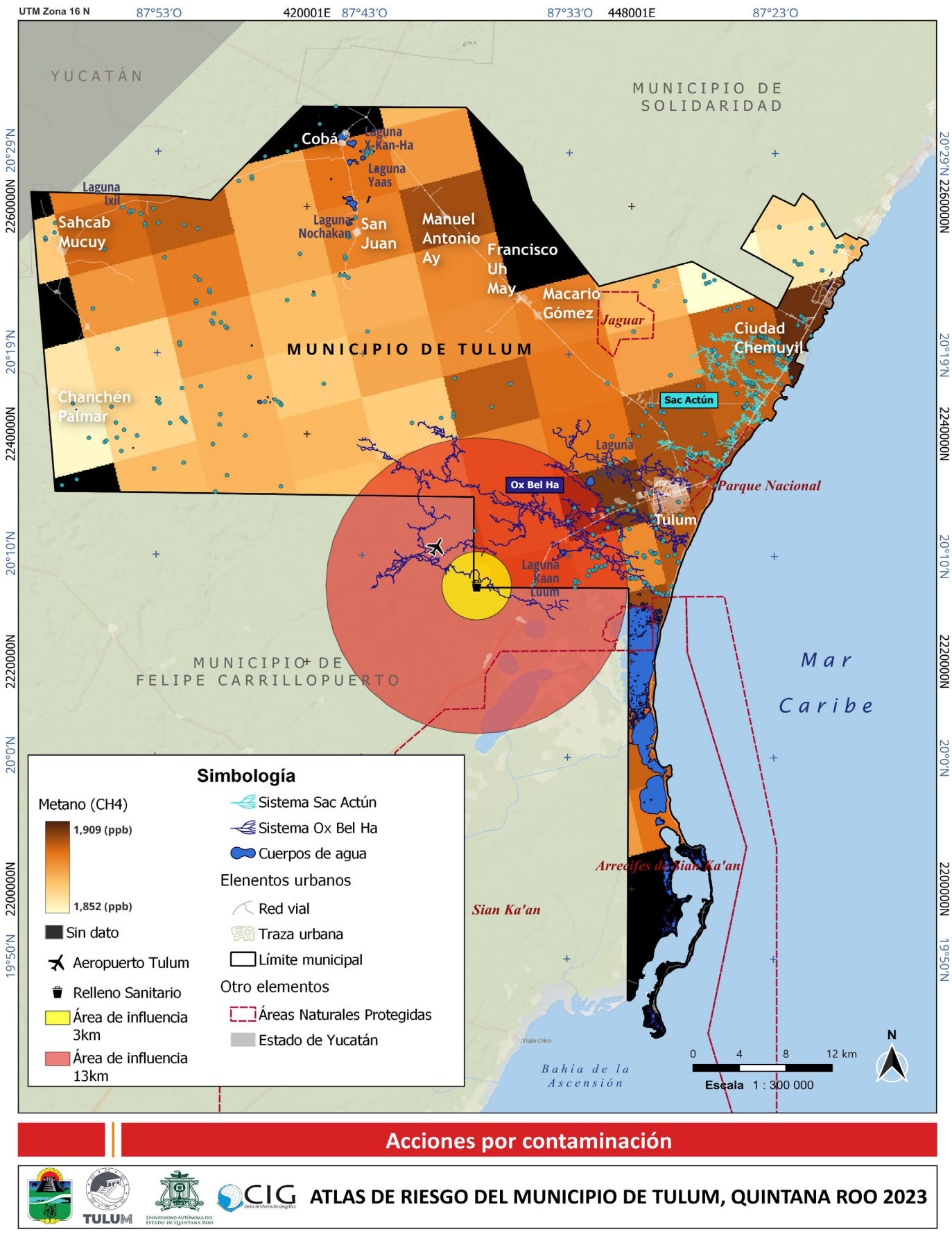
Contaminación.

Como nos señalan Armenta-Rivas, et al. (2017) "El metano generado en rellenos sanitarios se puede presentar como un problema ambiental en la gestión de los residuos sólidos, pero también se considera como un beneficio por su alto potencial energético". El metano se produce por la descomposición o putrefacción de la materia orgánica y puede introducirse en la atmósfera tanto por procesos naturales, como la descomposición de la materia en los pantanos y actividades humanas. Para el municipio de Tulum, la principal generación de este gas sería en el relleno sanitario, el cual, como se puede observar no genera un problema ambiental para la población, pero si para sus recursos naturales (figura 363). Sus niveles de generación para este gas en mínimo, se observa más en áreas con mayor concentración de actividad humana y en las vías de rodamiento principales (figura 354). La acción o recomendación en este caso sería con relación a la ubicación del relleno sanitario de acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004).

Propuestas/Acciones (figura 363)

- Un sitio de disposición final NO debe ubicarse a una distancia menor de 13 kilómetros del centro de la(s) pista(s) de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto, el cual no se cumple, observando que el Aeropuerto Internacional de Tulum, oficialmente Aeropuerto Internacional Felipe Carrillo Puerto, se localiza a 5 kilómetros aproximadamente en línea recta. Esto implicaría reubicarlo.
- No debe ubicarse en zonas de: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas. El relleno sanitario se localiza encima del sistema de cuevas Ox Bel Ha, lo que hace necesaria su reubicación.
- Se debe demostrar que no existirá obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integren el sitio de disposición final, verificar con estudios de mecánica de suelo e hidrogeológicos. Se localiza sobre un sistema subterráneo de flujo de agua.
- Realizar estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio verificando la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004).
- Se debe cuantificar el lixiviado mediante algún balance hídrico, ya que esto puede ser causa de la contaminación del acuífero.

Figura 363. Acciones y propuestas por contaminación



Fuente: Elaboración propia.

9. Referencias bibliográficas:

- AFP (08/09/2017). Intensa llamarada solar afecta a conexiones GPS de la Tierra. Los Tiempos. Recuperado de: https://www.lostiempos.com/tendencias/ciencia/20170908/intensa-llamarada-solar-afecta-conexiones-gps-tierra

- Agua Simple (2022). ¿De dónde viene la palabra huracán? Agua Simple. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Consejo Consultivo del Agua, A.C. Revista Digital No. 2. Recuperado de: http://atl.org.mx/RevistasAguaSimple/revistav2/index.php?option=com_content&view=article&id=13:ide-donde-viene-la-palabra-huracan&catid=2:tambien-es-agua&Itemid=3 [1/10/2022]

- Aguilar-Velázquez, Mirurgia. (2022). Estimación del Riesgo por hundimientos en terrenos cársicos. Contexto Universitario en función del desarrollo local. Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina, 10(3), E28. Epub 01 de diciembre De 2022. Recuperado el 28 De agosto de 2023, de: Http://Scielo.Sld.Cu/Scielo.Php?Script=Sci_Arttext&Pid=S2308-01322022000300028&Lng=Es&Tlng=Es.

- Aguilar, E. (2021). Sistema de Alerta Temprana de Clima Espacial. Curso Fenómenos Astronómicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 28 de mayo de 2021. Escuela Nacional de Protección Civil (ENAPROC). Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/656389/TEMA_8_FENOMENOS_ASTRONOMICOS.pdf

- Alcaldes de México (mayo 25 2015). Tornado categoría 4 azota Ciudad Acuña, Coahuila (video y galería). Recuperado de: https://www.alcaldesdemexico.com/notas-principales/tornado-categoria-4-azota-ciudad-acuna-coahuila-video-y-galeria/

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. Tecnologia y Ciencias Del Agua, 7(5), 33–55.

- Alejandro Huitrón Hernández. (2017). 1 médico por cada 800 pacientes, la realidad en Quintana Roo [Noticias]. Saludiario. https://www.saludiario.com/en-quintana-roo-hay-un-medico-por-cada-800-pacientes/

- Ambientum (25 noviembre 2022). La circulación general de la atmósfera. Recuperado de: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/atmosfera/la-circulacion-general-de-la-atmosfera.asp

- Aparicio Mijares, F. J. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie (8. reimpr). Limusa Noriega Ed.

- Arcos, L. A., López, Á. L., Barquín, R. D. C. S., & Martínez, O. F. (2015). Diferencias socio-territoriales en Tulum: una ciudad organizada a partir del turismo masivo litoral. CULTUR-Revista de Cultura e Turismo, 9(2), 04-28.

- Armenta-Rivas, Maysson Esmi, Sierra-Camargo, Liseth Dayana, & Vélez-Pereira, Andrés M. (2017). Modelación de la producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana (Santa Marta). Ingeniería, investigación y tecnología, 18(2), 183-192. Recuperado en 03 de septiembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000200183&lng=es&tlng=es.

- American Meteorological Society (AMS) (November 2020). Glossary Meteorology. Tornado. Recuperado de: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Tornado

- ANR (s.f.). Atlas Nacional de Riesgo (ANR). Gobierno de México. Recuperado el 22 marzo 2023 de http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT=Quintana%20Roo&CVE_ENT=23

- Barragán, M. (s.f.). Políticas Públicas y Protección Civil en Clima Espacial. Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/656390/TEMA_9_FENOMENOS_ASTRONOMICOS.pdf

- Bonnet, F., & Butterlin, J. (1962). Stratigraphy of the northern part of the Yucatan Peninsula. Field trip to Peninsula of Yucatan guide book. (New Orleans Geological Society).

- Brunner, G. W., Sánchez, A., Molls, T., Ford, D., & Parr, D. A. (2020). HEC-RAS Verification and Validation Tests (p. 156). U.S .Army Corps of Engineers/Institute for Water Resources. https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/hgt/latest/reference-documents?preview=/91881845/91881848/RD-52_HEC-RAS%20Verification%20and%20Validation_Sept2020.pdf

- Buol, S. W. (Ed.). (2011). Soil genesis and classification (6th ed). Wiley-Blackwell.

- Carey, D., & Witt, E. (2006). Generalized Geologic Map for Land-Use Planning: Clark County, Kentucky [Map]. Kentucky Geological Survey. https://kgs.uky.edu/kgsweb/olops/pub/kgs/mc148_12.pdf

- Carreño, E. (2005). ¿Qué es un tsunami? En Ambienta. Febrero 2005. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional. España.

- Castillo, M-L. (2017). Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres asociados a huracanes: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen. Coord. Proyecto CONACYT (248375): Atención a problemas nacionales UQROO. Universidad de Quintana Roo. México.

- CENAPRED (2022). Los sismos históricos de septiembre Disponible en: https://www.gob.mx/cenapred/articulos/los-sismos-historicos-de-septiembre?idiom=es. Recuperado el 19 de enero 2023

- CENAPRED (2021). Fenómenos Geológicos. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Versión electrónica, 2021. ISBN 970-628-902-X. Recuperado el 20 de enero 2023 de: https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/55.pdf

- CENAPRED, (2021). Tormentas Severas. Serie Fascículos. Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Versión electrónica. México. Recuperado de: https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/189-FASCCULOTORMENTASSEVERAS.PDF

- CENAPRED (2016). Metodología para elaborar mapas de riesgo por temperaturas máximas (1ª etapa ondas de calor). Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos. Sistema Nacional de Protección Civil. Febrero 2016. México.

- CENAPRED (2014). Tsunamis. Serie Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Secretaría de Gobernación. Versión electrónica, 2014. ISBN 970-628-875-9. Recuperado el 20 de enero 2023 de: https://www.gob.mx/cenapred/documentos/fasciculo-tsunamis

- CENAPRED. (2014b). Serie fascículos: heladas. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaria de Gobernación.

- CENAPRED (2012). Mapas de Índices de Riesgo a escala Municipal por Fenómenos Hidrometeorológicos. Marzo 2012. Secretaría de Gobernación. Recuperado de: http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Metodologias/Hidrometeorologico.pdf

- CENAPRED. (2007). Serie fascículos: Riesgos químicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaria de Gobernación.

- CENAPRED. (2006). Guía básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: evaluación de la vulnerabilidad física y social. (2006). Secretaría de Gobernación : Centro Nacional de Prevención de Desastres.

- CENAPRED. (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: atlas nacional de riesgos de la

República Mexicana (1. ed). Secretaría de Gobernación, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres.

- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas [CEFP, 2020]. Nota informativa. Recursos para los Programas. G004 “Protección Contra Riesgos Sanitarios” y U009 “Vigilancia Epidemiológica”, PEF 2020. Cámara de Diputados. LXIV Legislatura. Mexico.

- CENTRO DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA-UQROO. (2009). Indicadores de Desarrollo Humano, Chetumal, Quintana Roo.

- Choy, G. L., & Boatwright, J. L. (1995). Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B9), 18205–18228. https://doi.org/10.1029/95JB01969

- COI-UNESCO (2019). Comisión Oceanográfica Intergubernamental. Glosario de tsunamis, cuarta edición, 2019. Colección Técnica de la COI, 85. París, UNESCO, 2019 (árabe, chino, español, francés e inglés) (IOC/2008/TS/85rev.4)

- Coordinación Estatal de Protección Civil. Recuperado de: https://qroo.gob.mx/coeproc/ciclones-tropicales-con-influencia-en-el-territorio-estatal/ [20/10/2022]

- Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Versión: 2.0. Argentina. Recuperado de: https://documentoside.conae.gov.ar/public/docs/prd/sen5p/tropomi/no2m/20200326_GVT_SSU_UEAT_GE_v02_002_CONAE_TROPOMI_NO2.pdf

- CONAFOR (2010), Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores.

- CONAGUA (2023). Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Proyecto de Bases de Datos Climatológicos. Recuperado de: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica

- CONAGUA (2022). Etapas de Evolución. Comisión Nacional del Agua. Gobierno de México. Recuperado de: https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/etapas-de-evolucion [20/10/2022]

- CONAGUA (2022). Estaciones meteorológicas de los municipios de Quintana Roo. Gerencia Estatal Quintana Roo. Área Técnica.

- CONAGUA (2017). Estaciones meteorológicas de los municipios de Quintana Roo. Gerencia Estatal Quintana Roo. Área Técnica.

- CONAGUA (2015). Atlas del Agua en México 2015 (Two thousand, fifteenth).

- CONAPO (s.f.). Índices de marginación 2020. Gob. Mx. Recuperado el 28 enero, 2023, de: https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372

- CONAPO. (2022). Índice de marginación urbana por colonia 2020. Nota técnico-metodológica. Abril 2022.

- CONAPO. (2021). Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2020. Nota técnico-metodológica. Diciembre 2021.

- CONAPO. (2021a). Índice de marginación por localidad 2020. Nota técnico-metodológica. Septiembre 2021.

- CONAPO. (2021b). Índice de marginación urbana 2020. Nota técnico-metodológica. Septiembre 2021.

- CONAPO (2019). Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015-2030 (base 2). Consejo Nacional de Población. Datos abiertos. Disponible en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-y-de-las-entidades-federativas-2016-2050/resource/5a860cde-d0c7-40da-9efe-5234aeecf741

- CONAPO. (2019). Proyecciones de la población de México y de las Entidades Federativas 2016 - 2050. Quintana Roo. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/487379/23_ROO.pdf

- CONEVAL (2021). Medición de la pobreza en los municipios de México, 2020. Disponible en: https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Pobreza_municipal/2020/Presentacion_Pobreza_Municipal_2020.pdf

- CONEVAL (2021a). Medición de la pobreza. Pobreza a nivel municipio 2010-2020. Anexo Estadístico 2010-2020. Disponible en: https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx

- CONEVAL (2021b). ¿Qué son las líneas de pobreza por ingresos y pobreza extrema por ingresos? Disponible en: https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Lineas_de_Pobreza_por_Ingresos/Lineas_de_Pobreza_por_Ingresos.pdf#search=por%20debajo%20de%20la%20l%C3%ADnea

- CONEVAL (s.f.). Medición de la Pobreza. Pobreza a nivel municipio 2010-2020. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx

- CONEVAL (2017). La pobreza en los municipios de México, 2015. Diciembre 2017. Disponible en: https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Pobreza_municipal/Presentacion_resultados_pobreza_municipal_2015.pdf

- CRED (2023). 2022 Disaster in numbers. Center for Research on the Epidemiology of Disaster. Brussels.

- Dávila, S. & Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (2002). Peligro geológico por agrietamiento de suelos que comprometen la seguridad física del caserío de Viscas / Derrumbe y flujos de lodo en la localidad de Potaca que afecta la carretera Carhuaz – Chacas. Distrito de Chacas, provincia de Asunción, departamento de Áncash. Lima: INGEMMET, Informe Técnico A5955, 21 p.

- De la Rosa, Y. (24 mayo 2022). México tiene déficit de médicos especialistas: SSA. Forbes. https://www.forbes.com.mx/mexico-tiene-deficit-de-medicos-especialistas-ssa/

- De la Rosa, Y. (24 mayo 2022). México tiene déficit de médicos especialistas: SSA. Forbes. https://www.forbes.com.mx/mexico-tiene-deficit-de-medicos-especialistas-ssa/

- DGPC (31/01/2020). El ABC de los fenómenos perturbadores. Gobierno de México. http://www.preparados.cenapred.unam.mx/fenomenos

- DOF: 27/02/2023. ACUERDO por el que se dan a conocer los valores de cada una de las variables que integran las fórmulas para determinar durante el ejercicio fiscal 2023 las zonas de disponibilidad, a que se refieren las fracciones I y II, del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos, vigente a partir del 1 de enero de 2014. Consultado el 2 de marzo 2023. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5680859&fecha=27/02/2023#gsc.tab=0

- Diario Oficial de la Federación [DOF, 2020]. ACUERDO por el que el Consejo de Salubridad General reconoce la epidemia de enfermedad por el virus SARS-CoV2 (COVID-19) en México como una enfermedad grave de atención prioritaria, así como se establecen las actividades de preparación y respuesta ante dicha epidemia. México.

- DOF. (2016). Acuerdo por el que se emite la Guía de contenido mínimo para la elaboración del Atlas Nacional de Riesgos. Diario Oficial de la Federación. Miércoles 21 de diciembre de 2016.

- DOF 03-06-2014. Diario Oficial de la Federación. Ley General de Protección Civil. Últimas reformas publicadas DOF 03-06-2014. Capítulo III, Artículo 19, Fracción XXII. Secretaría de Gobernación.

- DOF - Diario Oficial de la Federación. (2014). Programa Nacional de Desarrollo Urbano 2014-2018. Gobierno de Mexico.

Recuperado febrero 5, 2023, de https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342867&fecha=30/04/2014

- DOF - Diario Oficial de la Federación (2012). Ley General de Protección Civil (LGPC). DOF. Gobierno de México.
- Diario Oficial de la Federación [DOF] (31 julio 2008). Guía de Aplicación del Sistema de Protección Contra Tormentas Eléctricas. NMX-J-603-ANCE-2008.
- Diario Oficial de la Federación (20/10/2004), [DOF, 2004]. NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.
- Dlugokencky, E., Houweling, S., Dirksen, R., Schröder, R., Hurst,D., Forster, P. & Secretaría de la OMM (2016). Observación del vapor de agua. Bulletin nº: Vol 65 (2) – 2016. Organización Meteorológica Mundial (OMM). Recuperado de: https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/observacio%CC%81n-del-vapor-de-agua
- Elsner JB, Hodges RE, Jagger TH (2012) Spatial grids for hurricane climate research. Clim Dyn 39:21–36. https://doi.org/10.1007/s00382-011-1066-5
- Encinas, M. (2011). Medio Ambiente y Contaminación. Principios básicos. 1ª edición. ISBN: 978-84-615-1145-7.
- Estrada-Medina, H., Valdez, S., Zanatta A., (2008). Análisis de compresión en rocas calizas de Yucatán. Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM 17 al 19 de septiembre, 2008 Puebla, México.
- Eslava, H. (2020). Tormentas severas. Fenómenos hidrometeorológicos. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/591018/TEMA_3_FENOMENOS_HIDROMETEOROLOGICOS.pdf
- European Space Agency (21/06/2018). Asteroid danger explained. Space Safety. ESA. Recuperado de: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/06/Asteroid_danger_explained
- Flores G., J.G.; Benavides S., J.D.; Casillas D., U.D.; Hernández N., M.A.; Leal A. H.J.; 2016. Manual para la elaboración de mapas de riesgo de incendios forestales. Libro Técnico. Núm. 1. INIFAP-CIRPAC. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, México.
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., and Pereira, A., (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 31, no. 1, p. 127–137. https://www.researchgate.net/publication/261513181_Caracterizacion_de_las_depresiones_karsticas_forma_tamano_y_densidad_a_escala_150000_y_sus_tipos_de_inundacion_en_el_Estado_de_Quintana_Roo_Mexico
- Gallagher, Frank W., III (Octubre de 2000). "Distant Green Thunderstorms – Frazer's Theory Revisited". Journal of Applied Meteorology. American Meteorological Society. 39 (10): 1754. Bibcode:2000JApMe.39.1754G. doi:10.1175/1520-0450-39.10.1754.
- García, M. & Lanfri, M. (2020). Promedio mensual de la columna troposférica de NO2 TROPOMI/Sentinel5p. Gerencia de Vinculación Tecnológica.
- Garcia Gil, G., & Graniel Castro, E. (2011). Geologia. In Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán (Centro de Investigación Científica de Yucatán). Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- GEOEnciclopedia. Mar Caribe. (2023, enero 9). Recuperado marzo 1, 2023, de GeoEnciclopedia: https://www.geoenciclopedia.com/mar-caribe-142.html
- Gobierno Municipal de Solidaridad, Q. R. (2007). Actualización del Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030.
- Google Earth Engine [GEE] (2022). Análisis a nivel planetario en la nube de Google https://www.google.com/intl/es_ALL/earth/education/tools/google-earth-engine/
- Gómez-Rivera, A., Galicia-Hernández, Y., Aguirre-Crespo, A., Ruiz-Muñiz, O., Sosa-Molina, H. & Suárez-Fernández, F. (2020). Perfil epidemiológico de la infección respiratoria por SARS-CoV-2 en Quintana Roo, México. Secretaria de Salud del Estado de Quintana Roo (SESA). México. Recuperado de: https://salud.qroo.gob.mx/revista/index.php/component/content/article?id=133
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2004). Ingeniería Geológica. ISBN: 84-205-3104-9. PRENTICE HALL. España.
- Guevara, E., Quaas, R. y Fernández, G. (2006). Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica. SEGOB. CENAPRED. ISBN: 970-628-904-6. México.
- Guillermo de Anda. (2018). Documental El Gran Acuifero Maya.
- Gutiérrez Martínez, C. A. (2006). Guia básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: fenómenos geológicos. Secretaría de Gobernación : Centro Nacional de Prevención de Desastres. /https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/55.pdf
- Gutiérrez, F. y Arauzo, T. (1997). Subsidencia kárstica sedimentaria en un sistema aluvial efímero: El Barranco de Torrecilla (Depresión del Ebro, Zaragoza). Cuadernos de Geología Ibérica, núm. 22, 349-372. Servicio de Publicaciones. Universidad Complutense, Madrid. España.
- H. Ayuntamiento del municipio de Tulum, Quintana Roo (2006). Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Tulum 2006-2030 (PDU). Ayuntamiento 2005-2008 de Tulum, Quintana Roo.
- H. Congreso de la Unión. (2012). Ley General de Protección Civil. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de mayo de 2021.
- Hand, W. H.; Cappelluti, G. (January 2011). "A global hail climatology using the UK Met Office convection diagnosis procedure (CDP) and model analyses". Meteorological Applications. Wiley. 18 (4): 446. Bibcode:2011MeApp.18.446H. doi:10.1002/met.236.
- Hayes, M. (2000). "Revisiting the SPI: Clarifying the Process". Drought Network News (1994-2001). 18. https://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/18
- Hernández Aguilar, M-L., Sanchez Casanova, D., López Montejo, G-D. & Cabrera Guillermo, R. (2022). Monitoreo de la sequía mediante el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) a través del uso de geotecnologías. En B-L., Campos, M-L., Hernández & N., Oropeza (Coord.), Análisis Territorial y el Uso de Tecnologías Geoespaciales (pp. 39-56). Universidad Autónoma del Estado De Quintana Roo.
- Hernández-Aguilar, M. L., Martínez-Torres, R. M., & López-Montejo, G. D. (2021). Índice de resiliencia urbana costera para el manejo de residuos sólidos urbanos. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 29(84), e2808, https://doi.org/10.33064/iycuaa2021842808
- Hernández, M-L., & López, D. (2021). Distribución espacial y valoración de la susceptibilidad de fenómenos kársticos al sur de Quintana Roo. En: Bautista (2021). Los territorios kársticos de la península de Yucatán: caracterización, manejo y riesgos. Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst. Ciudad de México. 196 pp.
- Hernández, M-L y López, D. (2020). Atlas de riesgo como instrumentos de Sistemas de Alertas Tempranas. En Frausto, O., Morales, J. y Aguilar, C. Cords. Sistema de alerta temprana ante fenómenos hidrometeorológicos extremos en México. UAGRO. REDESCLIM - CONACYT. ISBN: 978-607-8755-09-7. Pp. 87-102. México.
- Hernández, M.L. (2019). Riesgo de hundimientos y subsidencia kárstica en la zona maya de Quintana Roo. En O. Frausto ed.

Conocimientos y saberes del karst tropical en México. México. Conocimientos y saberes del karst tropical en México. México. pp. 115-235.

- Hernández Aguilar, M. L.., Frausto Martínez, O. & Arroyo, L., (2019). Resiliencia urbano-costera frente al cambio climático desde el enfoque socio-ecológico: El caso de Tulum, Q. Roo. En M. L. Castillo Villanueva, D. Velázquez Torres, R. Chávez Alvarado, & J. M. Camacho Sanabria (Coords.), Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres por huracanes (pp. 205-225). Chetumal, México: Universidad de Quintana Roo.

- Hernández, M. L., Carreño, M. L., & Castillo, L. (2018). Methodologies and tools of risk management: Hurricane risk index (HRi). International Journal of Disaster Risk Reduction, 31, 926-937.

- Hernández Aguilar, M-L., López Montejo, G., Chávez Alvarado, R., Camacho Sanabria, J., Arriaga Rodríguez J., Arroyo Arcos, L. y Martínez Torres R. (2018) "Diagnóstico de la ciudad de Tulum". En Velázquez, D., (Coord.), Diagnóstico de ciudades costeras ante huracanes para la construcción de resiliencia. Universidad de Quintana Roo, 2018, 136 p. ISBN Obra independiente: 978-607-9448-59-2. Sello Editorial: Universidad de Quintana Roo (607-9448). Pp. 59-87

- Hernández, M-L. (2014). Evaluación del riesgo y vulnerabilidad ante la amenaza de huracanes en zonas costeras del Caribe Mexicano: Chetumal y Mahahual (Tesis doctoral). Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo, México.

- Huerta Pineda, A. (2016). Carencias Sociales: una visión desde el Proyecto de Presupuesto de Egresos de la Federación 2016. Economía Informa, 399, 77–87. https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.08.006

- IGN (2021). Plan Estatal de Protección Civil ante el riesgo de maremotos. Edición comentada. Instituto Geográfico Nacional. 1ª Edición - Editado en diciembre de 2021. Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado. Madrid, España.

- INEGI. (2023). Banco de Indicadores [Sistema]. https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/default.aspx

- INEGI (2022). Estadísticas de defunciones registradas 2021(preliminar). Comunicado de prensa núm. 378/22. 27 de julio 2022. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/dr/dr2021_07.pdf

- INEGI (2022a). Estadísticas a propósito del día mundial de la población datos nacionales. Comunicado de prensa núm. 358/22. 7 de julio 2022. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2022/EAP_Poblac22.pdf

- INEGI, (2022b). Marco Geoestadístico, diciembre 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI (2022c). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México. Recuperadio de https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx

- INEGI (2021). Principales resultados por AGEB y manzana urbana 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. 2021. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), México.

- INEGI (2021). Estadísticas a propósito de las personas ocupadas como médicos (23 de octubre). Comunicado de prensa núm. 580/21. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=7757

- INEGI (2021a). Estadísticas de Defunciones Registradas 2021. Mortalidad. Cuéntame. Población de México. Disponible en: https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/mortalidad.aspx?tema=P

- INEGI (2021b). Estadísticas de mortalidad. Conjunto de datos: Defunciones registradas (mortalidad general). Disponible en: https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/mortalidad/MortalidadGeneral.asp

- INEGI (2021c) Subsistema de Información Demográfica y Social. Natalidad. Conjunto de datos: 1. Nacimientos registrados por municipio de residencia habitual de la madre y sexo del registrado según año de ocurrencia. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=11829

- INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. México.

- INEGI, (2020a). Principales Resultado por Localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI, (2020b). Tabulados del cuestionario básico. Censo de Población y Vivienda 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI, (2020c). Panorama sociodemográfico de 2020. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI (2019). Cartas Geológicas 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.

- INEGI (2019a). Cartas Topográficas 1:250 000. Edafología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI (2019b). Cartas Topográficas 1:250 000. Litología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI. (2019c). Tabulados interactivo (SAIC) Censos Económicos 2019. Recuperado: febrero 3, 2023, de: https://www.inegi.org.mx/app/saic/default.html

- INEGI (2019d). Cartas Topográficas 1:250 000. Hidrología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- INEGI (2018). Conjunto de datos vectoriales. Topografía. Cartas Escala 1:50 000. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/

- INEGI (2018). Estructura del Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN 2018). Instituto Nacional de Estadística y Geografía: INEGI, México. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/scian/estructura2018.pdf

- INEGI. (2017). Edafología de México (Segunda). CONABIO. COEPROC (2022). Ciclones Tropicales con más influencia en el Territorio Estatal.

- INEGI. (2016). Estudio de información integrada del acuífero cárstico Península de Yucatán (p. 132).

- INEGI (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México.

- INEGI (2002). Estudio Hidrológico del Estado de Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. ISBN 970-13-3737-9. México. Primera edición. 96 p.p. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224196/702825224196_1.pdf

- INEGI. (s.f.). Indicadores laborales para los municipios de México 2020. Estimación en áreas pequeñas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. Recuperado: febrero 3, 2023, de https://www.inegi.org.mx/investigacion/ilmm/2020/

- International Union of Soil Sciences (2008). Base referencial mundial del recurso suelo: un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. ISBN 978-92-5-305511-1. OCLC 948565731. Consultado el 31 de enero de 2023.

- Instituto Politécnico Nacional (s.f.) Agrietamientos. Secretaria de Educación Pública. https://www.esiatic.ipn.mx/geofenomenos/agrietamientos/agrietamientos.html
- INVDES (25 agosto 2019). Tornados cómo y por qué se forman. Investigación y Desarrollo. Recuperado de: https://invdes.com.mx/infografias/tornados-como-y-por-que-se-forman/
- INSUS (2020). Política Nacional de Suelo. Instituto Nacional de suelo Sustentable. Gobierno de México. Disponible en: http://insus.gob.mx/archivos/PSN/Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Suelo.pdf
- IPCC. (2014). Part A: Global and sectoral aspects. (Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability., 1132. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf
- Jimenez Espinoza, M., Baeza Ramirez, C., & Monroy Cruz, V. (2016). Metodología para elaborar mapas de riesgo por temperaturas máximas (p. 18). CENAPRED. https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/33.pdf
- Jonkepa (22 mayo 2013). Escala Fujita de Tornados. Enseñanzas Náuticas para conocer la mar y todo lo que le rodea. Recuperado de: https://nauticajonkepa.wordpress.com/2013/05/22/escala-fujita-de-tornados/
- Kambesis, P.N. and Coke IV, J.G., 2016. The Sac Actun System, Quintana Roo, Mexico. Boletín Geológico y Minero, 127 (1): 177-192 ISSN: 0366-0176. Disponible en: https://www.igme.es/Boletin/2016/127_1/BG_127-1_Art-12.pdf [10/10/2022]
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck, C. J. (2018). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4 [Data set]. NOAA National Centers for Environmental Information. https://doi.org/10.25921/82TY-9E16
- Kucieńska, B., Raga, G. B.& Rodríguez, O. (2010). Cloud-to-ground lightning over Mexico and adjacent oceanic regions: a preliminary climatology using the WWLLN dataset, Ann. Geophys., 28, 2047–2057, https://doi.org/10.5194/angeo-28-2047-2010.
- La Poderosa (3 de junio 2015) Trayecto del tornado en Acuña Coahuila del 25 de mayo de 2015. Recuperado de: https://www.imer.mx/lapoderosa/trayecto-del-tornado-en-acuna-coahuila-del-25-de-mayo-de-2015/.
- León-Cruz, J. F., Caetano, E., Cortés-Ramos, J., Dominguez, C., & Méndez-Pérez, J. M. (2023). Thunderstorm and hailstorm environments in Mexico. International Journal of Climatology, 1–17. https://doi.org/10.1002/joc.8093
- León-Cruz, J.F., Castillo-Aja, R. A GIS-based approach for tornado risk assessment in Mexico. Nat Hazards 114, 1563–1583 (2022). https://doi.org/10.1007/s11069-022-05438-0
- León-Cruz JF, Pineda-Martínez LF, Carbajal N (2022) Tornado climatology and potentially severe convective environments in Mexico. Clim Res 87:147-165. https://doi.org/10.3354/cr01692 Monroy-Ríos, E. (2022). Karst Geochemistry and Hydrogeology. Disponible en: https://sites.northwestern.edu/monroyrios/entradas-en-espanol/sac-aktun/[28/10/2022]
- Ley General de Protección Civil, 43 (2020).
- LGPC. (2012). Ley General de Protección Civil. Diario Oficial de la Federación. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de mayo de 2021.
- Lugo, J. (2011). Diccionario geomorfológico. ISBN-13 (15): 978-607-02-2707-3. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Maine ACF. Tsunami: Maine's geologic hazards: Maine geological survey: (s.f.). Recuperado mazo 1, 2023, de Maine.gov: https://www.maine.gov/DACF/mgs/hazards/tsunamis/index.shtml
- Mansilla, G. (2013). Variaciones en los retardos transionosféricos de señales GPS como consecuencia de tormentas geomagnéticas. AnalesAFA. Universidad Nacional de Tucumán CONICET. Recuperado de: https://anales.fisica.org.ar/index.php/analesafa/article/view/1110
- Martínez Bringas, A., Gómez Vázquez, Á., & De la Cruz Reyna, S. (2004). Elaboración de mapas de peligros volcánicos. En Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (2004th ed., p. 389). CENAPRED.
- May, E. (2023). Espacialidad de los servicios ecosistémicos del karst en el municipio de Tulum, Quintana Roo. Tesis Doctorado (en proceso). Posgrado en Geografía. División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F. y Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. Revista Pilquen. Sección Agronomía. Año XIII. No.11. Argentina.
- Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. Meteorological Applications, 28(4), e2009.
- Monroy-Ríos, E. (2022). Karst Geochemistry and Hydrogeology. Disponible en: https://sites.northwestern.edu/monroyrios/entradas-en-espanol/sac-aktun/[28/10/2022]
- Monroy-Ríos. (2022, agosto 4). Comparación de cartografía de cuevas subacuáticas. Consultado el 26 de marzo, 2023, de Karst Geochemistry and Hydrogeology: https://sites.northwestern.edu/monroyrios/comparacion_cartografia_cuevas-subacuaticas/
- Monterde, D., Carbajal, N.., Pineda-Martínez, L. & León-Cruz, J. (2023). Analysis of a multiple non-supercell tornado event in Mexico, Atmospheric Research, Volume 293, 2023,106916, ISSN 0169-8095, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106916.
- Mora, L. (16 agosto 2020). ¿Los fenómenos astronómicos, debieron o no ser considerados en la Ley General de Protección Civil? Consejo Integrador de la Construcción, la Industria y el Desarrollo -INCIDE, A.C. Recuperado de: http://consejoincide.com/2020/08/16/gird-01/
- Moral, L. (2014). Cálculo de la susceptibilidad de deslizamiento del terreno en Lorca mediante un Sistema de Información Geográfica. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. España. Julio 2014. Trabajo de fin de grado.
- Morelli, C. (2007). Gestión de inundaciones urbanas. Organización Meteorológica Mundial (OMM). Recuperado de: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf
- Molerio León, L. (2020). Incorporación de la evidencia espeleológica de paleosismos y paleohidrología a la seguridad de los sistemas hidráulicos de América Latina y el Caribe. Cub@: Medio Ambiente Y Desarrollo, 20(38). Recuperado a partir de https://cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/view/9
- Müller R. The impact of the rise in atmospheric nitrous oxide on stratospheric ozone: This article belongs to Ambio's 50th Anniversary Collection. Theme: Ozone Layer. Ambio. 2021 Jan;50(1):35-39. doi: 10.1007/s13280-020-01428-3. PMID: 33222088; PMCID: PMC7708589.
- National Hurricane Center (2022). Tropical Cyclone Climatology. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane. National Oceanic and Atmospheric Administration. USA. Recuperado de:

https://www.nhc.noaa.gov/climo/[10/10/2022].

- National Hurricane Center (2022a). NHC Data Archive. National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane. National Oceanic and Atmospheric Administration. USA. Recuperado de: https://www.nhc.noaa.gov/data/ [10/10/2022].
- National Hurricane Center. (2021). The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. NOAA National Centers for Environmental Information. https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf
- National Hurricane Center. (2011). Storm Surge Overview. National Hurricane Center. https://web.archive.org/web/20120111062119/http://www.nhc.noaa.gov/ssurge/index.shtml
- Nationen, V. (Ed.). (2022). Our world at risk: Transforming governance for a resilient future. United Nations.
- NCEI (2023). Natural Hazards. Region 74 – Caribbean Sea. DOI:10.7289/V5PN93H7. Recuperado el 1 de marzo de 2023 desde https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-data?regionCode=74
- NOAA's International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) data, accessed on [31/10/22] https://www.ncei.noaa.gov/data/international-best-track-archive-for-climate-stewardship-ibtracs/v04r00/access/csv/
- NOAA (2023). What is a tsunami?? National Ocean Service website, https://oceanservice.noaa.gov/facts/tsunami.html, 01/20/23.
- NOAA (2013). ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4, Technical Documentation.
- NOAA (2006). Tsunami Travel Time Maps: Tsunami Sources. National Centers for Environmental Information website. Tsunami time travel maps - tsunami sources. (2006, July 28). U.S. https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_travel_time_events.shtml
- NORMA Oficial Mexicana NOM-018-STPS-2015, Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.
- Núñez López, Daniel, & Reyes Gómez, Víctor M., & Gadsden Esparza, Héctor, & Muñoz Robles, Carlos A., & Velasco Velasco, Israel (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. Agrociencia, 41(3),253-262. [fecha de Consulta 3 de febrero de 2023]. ISSN: 1405-3195. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30241301
- OCEANA. Protección de Hábitats: Atlántico. (2016, abril 25). Recuperado marzo 1, 2023, de Oceana Europe: https://europe.oceana.org/es/atlantico/
- Organización Estados Americanos [OEA, 1993]. Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos. Oficina de Asistencia para Desastres en el Extranjero Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Washington, D.C. Recuperado de: https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea65s/begin.htm#Contents
- OMM (1993): Vocabulario Meteorológico. Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Meteorológica Mundial [OMM] (21 abril 2023). El informe anual de la OMM pone de relieve el avance continuo del cambio climático. Recuperado de: https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-informe-anual-de-la-omm-pone-de-relieve-el-avance-continuo-del-cambio
- Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2012). Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-Nº 1090) (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- OMS (2017). La gestión de riesgos ante una pandemia de gripe: guía de la OMS para fundamentar y armonizar las medidas nacionales e internacionales de preparación y respuesta ante una pandemia. Geneva: Organización Mundial de la Salud; 2017. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- OMS (s.f.). Contaminación atmosférica. Organización Mundial de Salud. Recuperado de: https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- ONU-HABITAT (2018). Ciudades Resilientes. Recuperado de: https://onuhabitat.org.mx/index.php/ciudades-resilientes.
- ONU (2014). Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad. Guía de formación. Serie de capacitación profesional Num.19. Nueva York y Ginebra, 2014. Recuperado de: https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Publications/CRPD_TrainingGuide_PTS19_sp.pdf
- Papadopoulos G.A., Daskalaki E., Fokaefs A. (s.f.). Presentation on theme: "Tsunami Intensity: A Valuable Parameter of Multiple Usefulness Institute of Geodynamics National Observatory.
- Peralta, E. (2016). La productividad de la población económicamente activa (PEA) en México: historia, panorama actual y perspectiva. Entreciencias diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 4(10), 165–175. https://doi.org/10.21933/j.edsc.2016.10.180
- Prego, C. (23/enero/2022). Un recorrido visual por los mayores cráteres de impacto, las cicatrices que los meteoritos dejan en la Tierra. Xataka. Recuperado de: https://www.xataka.com/espacio/recorrido-visual-mayores-crateres-impacto-cicatrices-que-meteoritos-dejan-tierra
- QRSS (2018) List of Long Underwater Caves in Quintana Roo Mexico. Quintana Roo Speleological Survey. National Speleological Society (NSS). Consultada el 12 de enero de 2023.
- Ramírez, J., (1986). Tsunami. Revista geográfica de Chile. -- no. 29 (1986), p. [29]-39.
- Reglamento urbano para estaciones de servicio para la distribución de gasolina y combustibles líquidos producto de refinación del petróleo en el estado de Quintana Roo (2013)
- Rosengaus Moshinsky, M., Jiménez Espinosa, Martín., & Vázquez Conde, María. (2002). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. CENAPRED : IMTA.
- Ruiz Nápoles, Pablo, & Ordaz Díaz, Juan Luis. (2011). Evolución reciente del empleo y el desempleo en México. Economía UNAM, 8(23), 91-105. Recuperado en 13 de febrero de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-952X2011000200005&lng=es&tlng=es
- Saint-Loup, R., Felix, T., Maqueda, A., Schiller, A., & Renard, P. (2018). A survey of groundwater quality in Tulum region, Yucatan Peninsula, Mexico. Environmental Earth Sciences, 77(18), 644. https://doi.org/10.1007/s12665-018-7747-1
- Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L. E., & Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). En J. Alcocer & S. S. S. Sarma (Eds.), Advances in Mexican Limnology: Basic and Applied Aspects (pp. 215–228). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0415-2_19
- Secretaría de Protección Civil (2022). Recomendaciones de Protección Civil Dirigidas a las Autoridades Municipales por: Tormentas Eléctricas. Dirección General de Prevención de Riesgos. Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Recuperado de http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2022/04/TormentasElectricas_2022_

RecomAutMun.pdf

- Secretaría de Protección Civil de Veracruz (s.f.). Tormenta de granizo. Granizada. Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave Sistema Estatal de Protección Civil. México. Recuperado de: http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/swbcalendario_ElementoSeccion/720/RECOM..._POR_GRANIZADAS.PDF

- Selecciones (11 mayo 2018). ¿Cómo se produce una tormenta? Recuperado de: https://selecciones.com.mx/como-se-produce-una-tormenta/

- Serrano-Cumplido A, Antón-Eguía Ortega PB, Ruiz García A, Olmo Quintana V, Segura Fragoso A, Barquilla Garcia A, Morán Bayón Á. COVID-19. La historia se repite y seguimos tropezando con la misma piedra [COVID-19. History repeats itself and we keep stumbling on the same stone]. Semergen. 2020 Aug;46 Suppl 1:48-54. Spanish. doi: 10.1016/j.semerg.2020.06.008. Epub 2020 Jun 19. PMID: 32646730; PMCID: PMC7303648.

- Servicios Estatales de Salud del Estado de Quintana Roo. (2023). Diagnóstico de Salud de los Programas de Infraestructura y Servicios de Salud con Calidad 2023 (p. 8) [Anual]. Servicios Estatales de Salud. https://salud.qroo.gob.mx/portal/descargas/rendicion/archivos/2023/DIAGNOSTICO%20DE%20PROGRAMAS%20PRESUPUESTARIOS%202023/DIAGN%C3%93STICO%20DE%20SALUD%20DE%20LOS%20PROGRAMAS%20INFRA%20Y%20SERV.%20DE%20SALLUD%20CON%20CALIDAD%202023.pdf

- SESA. (2022). Diagnóstito situacional 2022 ({Anual} No. 2022; p. 79). Servicios Estatales de Salud.

- Servicios Estatales de Salud [SESA, 2021]. Panorama Epidemiológico Dengue del Estado de Quintana Roo 2020. Subdirección de Vigilancia Epidemiológica. Departamento de Información Epidemiológica. Chetumal Quintana Roo 15 de marzo del 2021. Recuperado de: https://qroo.gob.mx/sites/default/files/unisitio2021/03/PANORAMA%20EPIDEMIOLOGICO%20DENGUE%20QUINTANA%20ROO%202020.pdf

- SESA(2021). Recursos en Salud Sectorial 2021. Datos abiertos. Disponible en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/recursos-en-salud-nivel-central. Gobierno de México.

- SEMARNAT (2015) Compendio de Estadísticas Ambientales. Edición 2015. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2015/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet0ce4.html [10/11/2022]

- SEMARNAT. (2013). ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Península de Yucatán, clave 3105, estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo.

- SEMARNAT. (1987). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (p. 142).

- Servicio Meteorológico Nacional [SMN] (2023). Monitor de Sequía en México (MSM). Gobierno de México. Recuperado de: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico.

- SINAPROC-CENAPRED. (2006). Guia básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica. (2006). Secretaría de Gobernación : Centro Nacional de Prevención de Desastres.

- SINAPROC-CENAPRED. (2004). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Serie: Atlas Nacional de Riesgos (AR 1). Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). https://srala.org/wp-content/uploads/2015/11/GuiaBasicaAtlasRiesgos_CENAPRED_Mexico2004.pdf

- SGM (2020). Capa Geológica a nivel República a 1:250 000. Códigos litológicos. Servicio Geológico Mexicano. Recuperada de: https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#

- SGM (2020). Cartas Topográficas 1:50 000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) de Yacimientos Minerales. Bancos de rocas. Consultado en: https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/

- SIATL-INEGI (2018). Conjunto de datos vectoriales. Red Hidrográfica. Cartas Escala 1:50 000. Simulado de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#

- Smithsonian Institution. (2002). Global Volcano Locations Database. NOAA National Centers for Environmental Information.

- SNIGF (2023), Estadística de incendios forestales 2015-2022. Disponible en https://snif.cnf.gob.mx/datos-abiertos/

- SSN, (2015). Catálogo de sismos. Servicio Sismológico Nacional. UNAM. México. Disponible en: http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/bkpindex.jsp [20/10/2022].

- Suárez J., (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Bucaramanga, Colombia, 548.p.

- Tech (29 junio 2017). La vulnerabilidad de la red eléctrica ante tormentas solares. La Vanguardia. México. Recuperado de: https://vanguardia.com.mx/tech/la-vulnerabilidad-de-la-red-electrica-ante-tormentas-solares-OSVG3316383

- Tilling, R. I. (2005). Volcano hazards. In J. Marti & G. G. J. Ernst (Eds.), Volcanoes and the Environment (pp. 55–89). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511614767.003

- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsidencia del terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17(3), 295-302.

- UQROO-CIG (2018). Atlas Municipal de Riesgo de Felipe Carrillo Puerto 2018. Universidad de Quintana Roo. Centro de Información Geográfica. Chetumal, Quintana Roo. México.

- UQROO-CIG (2018a). Atlas Municipal de Riesgo de Benito Juárez 2018. Universidad de Quintana Roo. Centro de Información Geográfica. Chetumal,Quintana Roo. México.

- UNDRO/UNESCO. (1985). Volcanic emergency management. Naciones Unidas.

- UNISDR, (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.Primera Edición. Ginebra, Suiza.

- UNISDR (2010) Diagnóstico de la situación de riesgos de desastres en Chile. UNISDR. En: https://www.unisdr.org/files/18281_informenacionesunidas1.pdf

- Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], (2011). Descargas eléctricas mensuales, nube a tierra. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: https://ri.atmosfera.unam.mx/acdm/srv/spa/catalog.search#/metadata/d3dff83d-1778-4319-93e6-7aa2902faf59

- UN/ISDR (2012). Vínculos entre las dinámicas demográficas, los procesos de urbanización y los riesgos de desastres: una visión regional de América Latina. Rogelio Fernández; Haris Sanahuj ; United Nations Human Settlements Programme ; (ISDR) ; United Nations Population Fund (UNFPA). Disponible en: http://www.preventionweb.net/files/31104_doc18918contenido.pdf

- USGS. (2023). Search Earthquake Catalog.

- Vela, H. M. S., Flores, L. G., & Campa, E. E. M. (2015). Análisis cualitativo de la medición multidimensional de la pobreza en México. Economía Informa, 395, 22–34. https://doi.org/10.1016/j.ecin.2015.10.003

- Velázquez, A. (2016). ¿Sólo hay cenotes en la Península de Yucatán? Cienciorama. Divulgación de la Ciencia. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Disponible en http://

www.cienciorama.unam.mx/#!titulo/449/?solo-hay-cenotes-en-la-peninsula-de-yucatan.

- Ventanas al Universo (s.f.). Formación de Tormentas Eléctricas. Asociación Nacional de Maestros de Ciencias de la Tierra (por sus siglas al inglés, NESTA, National Earth Science Teachers Association). Recuperado de: https://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/tstorm/tstorm_formation.html&lang=sp

- Ward, W. C., Weidie, A. E., & Back, W. (1985). Geology and hydrogeology of the Yucatan and quaternary geology of northeastaern Yucatan Peninsula. New Orleans Geological Society.

- Watson, R. A., Holohan, E. P., Al-Halbouni, D., Saberi, L., Sawarieh, A., Closson, D., Alrshdan, H., Abou Karaki, N., Siebert, C., Walter, T. R., and Dahm, T.: Sinkholes and uvalas in evaporite karst: spatio-temporal development with links to base-level fall on the eastern shore of the Dead Sea, Solid Earth, 10, 1451–1468, https://doi.org/10.5194/se-10-1451-2019, 2019.

- Welti, R. (2005) La física del Tsunami. Ondas superficiales en el agua. Revista de Enseñanza de la Física. Vol. 18, (1): p. 83-92, 2005.

- White, W., 1988, Geomorphology and hydrogeology of karst terrains: USA, Oxford University Press, 465 pp.

- World Meteorological Organization. (2012). International Glossary of Hydrology (2012th ed.). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8209

- XII Legislatura Constitucional del Esta0do Libre y Soberano de Quintana Roo. (6 mayo 2008). Decreto 007. Por el que se crea el municipio de Tulum, con Cabecera municipal en la Ciudad de Tulum.

- Zhang Z, Liu Y, Liu H, Hao A, Zhang Z. The impact of lockdown on nitrogen dioxide (NO2) over Central Asian countries during the COVID-19 pandemic. Environ Sci Pollut Res Int. 2022 Mar;29(13):18923-18931. doi: 10.1007/s11356-021-17140-y. Epub 2021 Oct 27. PMID: 34705200; PMCID: PMC8548356.