



# Geociencias y riesgos socioambientales en Mesoamérica

Coordinadores  
Avith del Refugio Mendoza Ponce  
Miguel Ángel Alatorre Ibargüengoitia





# Geociencias y riesgos socioambientales en Mesoamérica

Coordinadores

Avith del Refugio Mendoza Ponce  
Miguel Ángel Alatorre Ibargüengoitia





El jaguar es una de las especies más representativas de la fauna chiapaneca y el símbolo por antonomasia de la biodiversidad en nuestro estado. Bajo su nombre están contenidos todos los títulos pertenecientes al ámbito de las ciencias naturales producidos en la universidad.

Primera edición: 2024

D. R. ©2024. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático  
1ª Avenida Sur Poniente número 1460  
C. P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.  
[www.unicach.mx](http://www.unicach.mx)  
[editorial@unicach.mx](mailto:editorial@unicach.mx)

ISBN: 978-607-543-239-7

Diseño de la colección: Manuel Cunjamá  
Diseño de portada: David Alejandro Rojas Serrano

Los capítulos que integran la obra fueron dictaminados por especialistas externos bajo la modalidad de pares ciegos

Impreso en México

## Índice

Prólogo.....	7
Formación del Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica en México: Observaciones Geológico-Ambientales para la Evaluación Integral del Impacto Sísmico .....	9
<i>M. Magdalena Velázquez-Bucio</i>	
La antropización de la cobertura vegetal de los paisajes físico-geográficos de la cuenca del río Armería en el estado de Colima .....	29
<i>María del Carmen Gardenia Jiménez-Velázquez,</i> <i>Horacio Morales-Iglesias,</i> <i>Luis Miguel Espinosa-Rodríguez</i>	
Análisis de riesgos de fenómenos naturales en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez.....	39
<i>Rosa Isabel Hernández-Sánchez,</i> <i>Salvador Isidro Belmonte-Jiménez,</i> <i>Angel Figueroa-Soto,</i> <i>Francisco Castellanos-León</i>	
Vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas .....	55
<i>Diana E. Guzmán-Morales,</i> <i>Angel E. Zúñiga-Tovar,</i> <i>Marcelino García-Benítez</i>	
Caracterización morfométrica de la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México .....	71
<i>Daniel Alejandro Gallegos-Pérez,</i> <i>Marcelino García-Benítez,</i> <i>Osías Ruiz-Álvarez,</i> <i>Walter López-Báez</i> <i>Gabriela Narcizo de Lima</i>	

Implicaciones de las inundaciones en la vulnerabilidad urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas .....	83
<i>Marcelino García-Benítez,</i>	
<i>Omar Ávila-Flores,</i>	
<i>Salvador Adame-Martínez,</i>	
<i>José Francisco Pinto-Castillo</i>	
Percepción del riesgo y participación social para la resiliencia ante inundaciones en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.....	101
<i>Gisselle Isabeau Ballinas-Altamirano,</i>	
<i>Andrea Venegas-Sandoval,</i>	
<i>Marcelino García-Benítez,</i>	
<i>Antonio Saldívar-Moreno</i>	
Monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas .....	119
<i>Emmanuel Díaz-Nigenda,</i>	
<i>Williams Vázquez-Morales,</i>	
<i>Rebeca Isabel Martínez-Salinas,</i>	
<i>Suhaila Elizabeth Díaz-Valencia,</i>	
<i>Andrea Venegas-Sandoval,</i>	
<i>José Francisco Pinto-Castillo.</i>	
Semblanzas .....	133

## Prólogo

La presente obra constituye un esfuerzo académico invaluable del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Aquí se abordan problemas de actualidad y muy necesarios sobre los impactos de diferentes fenómenos naturales en los geosistemas, mediante enfoques novedosos y rigurosos.

Es una obra dirigida a académicos, estudiantes de pre y posgrado, funcionarios gubernamentales de los tres niveles de gobierno y miembros de la sociedad civil preocupados por la relación naturaleza – sociedad, los problemas a que está expuesta la población por fenómenos naturales, sus causas, consecuencias y como mitigarlos.

El Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, logra reunir a más de 25 especialistas para abordar problemáticas tan urgentes como la necesidad de una respuesta rápida postsísmica ante eventos telúricos catastróficos; la antropización de la cobertura vegetal de los geosistemas y sus consecuencias sociales y ecológicas; el análisis de riesgos ante fenómenos naturales como la vulnerabilidad a la sequía, inundaciones, fallas, susceptibilidad de laderas y sismos; la vulnerabilidad ambiental y riesgos de inundación; la tan necesaria caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas como premisa para conocer sus potencialidades; la vulnerabilidad urbana ante inundaciones, la percepción del riesgo y la participación social ante inundaciones y el monitoreo de la calidad del aire, entre otros. Es de destacar que los autores poseen una rica experiencia en los temas abordados, lo cual asegura el rigor, la seriedad y competencia de los resultados obtenidos.

El lector interesado en estos temas encontrará en esta obra la coincidencia de enfoques novedosos con tecnología de punta. Así, se puede apreciar la aplicación en distintos ejemplos de la geografía de los paisajes; de tecnologías de punta de sistemas de información geográfica; el uso de multitud de datos estadísticos para apoyar las inferencias que se realizan y ejemplos concretos de aplicaciones en beneficios de la población en ciudades como Tuxtla Gutiérrez.

Resulta significativo que los estudios que acá nos comparten los colegas, no se limitan al estado de Chiapas. Por el contrario, abarcan todo el territorio nacional y también se hace énfasis a escalas más detalladas de zonas vulnerables de los estados de Michoacán, Colima, Oaxaca y Chiapas. De manera particular se abordan la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez y el estado de Chiapas; zonas de influencia directa y compromiso de primera prioridad de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

El Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas logra en este texto, reunir especialistas de diferentes instituciones como la ENES de la UNAM Campus Morelia; el Colegio Mexiquense; la Universidad Autónoma del Estado de México; el CONAHCyT; el Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca; el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; el Posgrado en Geografía de la UNAM, el Instituto de Geografía de la UNAM, la Universidad de Oporto (Portugal), el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y El Colegio de la Frontera Sur.

Lo anterior y los resultados que acá se exponen, señalan el indiscutible liderazgo del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, en los temas abordados. Esta institución ha devenido en centro de referencia regional y nacional sobre los problemas relacionados con los fenómenos naturales y sus consecuencias para la sociedad humana.

Esta obra se convierte así, en un referente ineludible para comprender las causas y consecuencias de los fenómenos naturales en nuestra sociedad. Las generaciones futuras de los especialistas en Ciencias de la Tierra, sin duda alguna, lo agradecerán.

Dr. Angel G. Priego Santander  
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental  
Universidad Nacional Autónoma de México



# Formación del Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica en México: Observaciones Geológico-Ambientales para la Evaluación Integral del Impacto Sísmico

M. Magdalena Velázquez-Bucio  
Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México  
magda\_vb@yahoo.com.mx

## Resumen

México se encuentra permanentemente expuesto a sismos de subducción de tipo interplaca (convergencia de placas Cocos-Norteamericana), intraplaca (placa Cocos), como de origen cortical (placa Norteamericana). La experiencia con sismos recientes devastadores y la falta de una respuesta rápida postsísmica oportuna resalta la necesidad de que instituciones científicas, gubernamentales y sociales unan esfuerzos en la planificación de acciones inmediatas. Esto permitirá la recolección de datos valiosos para la investigación científica a través del reconocimiento y registro de los efectos geológico-ambientales generados por un sismo. La recopilación y análisis oportunos de estos efectos amplían nuestro entendimiento sobre la relación dinámica entre la actividad geológica y la evolución del paisaje, lo cual es esencial para una gestión eficaz de la seguridad de la población y la preservación de la infraestructura en zonas propensas a terremotos.

Actualmente se encuentra en proceso la formación de un grupo de respuesta rápida postsísmica en México, cuyo éxito dependerá además de la coordinación entre sus integrantes, de una capacitación adecuada, la adopción de metodologías estandarizadas y un protocolo unificado para la recopilación, análisis y difusión de datos.

La colaboración entre universidades e instituciones y la cooperación con otros grupos nacionales e internacionales, de levantamiento de efectos sísmicos con experiencia en eventos sísmicos relevantes, fortalecerá la evolución y desempeño del grupo. Estos beneficios se reflejarán tanto en el trabajo de campo como en el análisis y la comunicación de los resultados en situaciones de emergencia, que constituyen el objetivo principal de este proyecto.

**Palabras clave:** Peligro sísmico, Escala ESI-07, Efectos Sísmico-Ambientales, emergencia postsísmica, riesgo residuo.

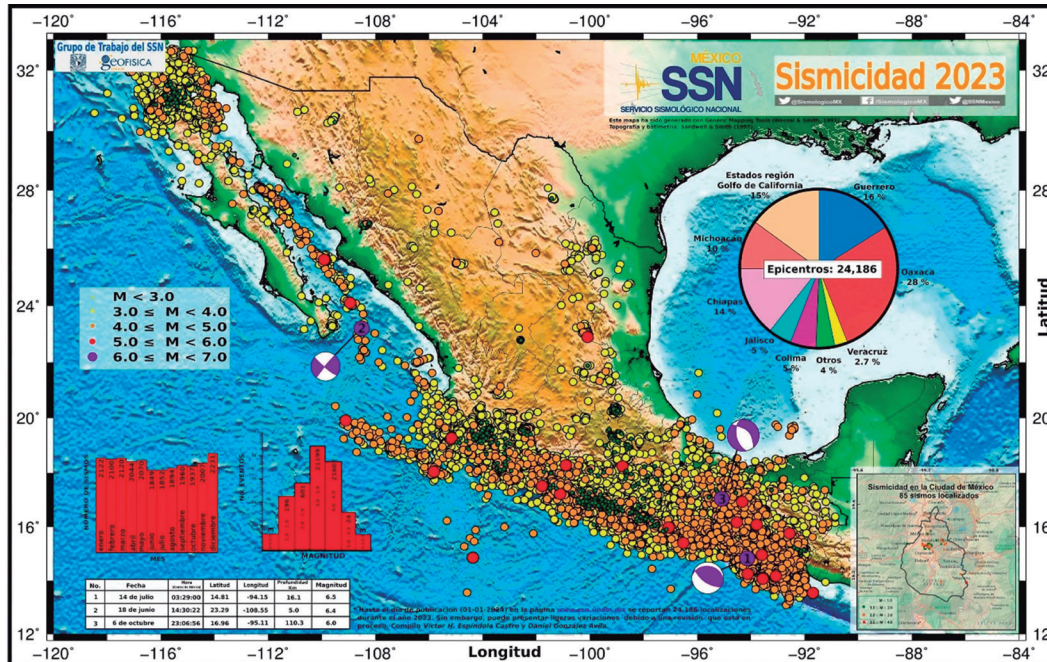
## Grandes sismos y sus efectos en el ambiente natural

Los sismos compiten con todos los otros fenómenos naturales como amenaza para la vida humana, sus actividades y sus bienes (Grotzinger y Jordan, 2016). Los sismos de gran

magnitud generan diversos efectos en el ambiente natural (“Efectos Sísmico-Ambientales”, ESA, o EEE; Earthquake Environmental Effects, por sus siglas en inglés; Guerrieri *et al.*, 2015). Estos efectos pueden agravar el impacto social del sismo en sí y representar una parte importante del impacto general. Ejemplos de eventos catastróficos recientes incluyen el sismo de Tohoku, Japón, en 2011, cuyo tsunami, generado por el sismo de Mw 9.1, provocó víctimas, daños estructurales y una crisis nuclear que obligó a la evacuación debido a la liberación de radiación. Otro caso es el sismo de Haití, en 2010, con una Mw 7.9 que causó deslizamientos de tierra exacerbados por la geografía y las intensas lluvias posteriores al evento. El sismo de Mw 9.1 en el Océano Índico en 2004, cuyo tsunami resultante causó la muerte de más de 230, 000 personas es otro ejemplo significativo. Así mismo, el sismo de Sichuan, China, 2008 de Mw 7.9, provocando más de 200 km de ruptura superficial y deslizamientos que sepultaron pueblos enteros y bloquearon ríos causando el represamiento, representando riesgo de inundación para poblaciones río abajo. Estos eventos resaltan la vulnerabilidad humana y de nuestro ambiente construido frente a los sismos. Al mismo tiempo, destacan que el movimiento vibratorio del suelo, producido por un sismo, aunque es una fuente grave de daños directos, no es de ninguna manera el único parámetro que debería ser considerado. La mayoría de los daños frecuentemente son causados por los efectos generados en el ambiente (ESA; Efectos Sísmico-Ambientales), ya sea directamente vinculado a la fuente sísmica o provocado por la vibración del suelo.

Estos sismos recientes en diversas partes del mundo, han destacado la necesidad de considerar a los ESA como elementos clave para la respuesta ante emergencias y para la evaluación del peligro sísmico. En México esto cobra gran importancia si tomamos en cuenta la alta densidad de la población en todo el país y en algunas ciudades en particular, así como zonas altamente vulnerables a tsunamis, ruptura superficial, deslizamientos y licuefacción.

México se encuentra en una región altamente sísmicamente activa (figura 1), donde la interacción de cinco placas tectónicas genera sismos de magnitud fuerte con frecuencia. Además, el país cuenta con numerosos sistemas de fallas corticales. Su entorno geológico, junto con una población densa e infraestructura extensa, aumenta la vulnerabilidad a los efectos de los eventos sísmicos. Una respuesta rápida y efectiva ante una emergencia sísmica, es esencial para proteger a las personas y reducir los daños materiales; además de permitir la recopilación de información fundamental para mejorar la respuesta de la sociedad ante futuros sismos.



**Figura 1.** Mapa de sismicidad anual de México, 2023. Sismos interplaca, intraplaca y corticales son comunes en territorio mexicano debido a la interacción de cinco placas tectónicas. (Imagen tomada del Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2024. <http://www.ssn.unam.mx/>)

En los últimos 120 años el registro sísmico instrumental de México ha registrado 23 sismos de  $M_w \geq 7.5$  en la zona de subducción mexicana (más de uno cada cinco años, en promedio; SSN, 2024). El catálogo de sismos históricos (Suárez y Albiní, 2009; Suárez, 2021) incluye registros de sismos que afectaron el territorio de México antes del periodo instrumental. A lo largo de su historia, el país ha experimentado sismos devastadores (tabla 1, figura 2), como el de Xalapa en 1920, que impactó varios poblados en Veracruz, más reciente el de Michoacán en 1985, con grandes daños en la Ciudad de México y los de 2017 en Chiapas y Morelos. Aunque estos han causado principalmente pérdidas humanas y daños estructurales, los efectos ambientales, han sido menos considerados.

Estos eventos sísmicos y su impacto en el territorio, destacan la necesidad de un grupo que involucre a instituciones científicas, gubernamentales y sociales, para coordinar esfuerzos y actuar de manera inmediata en la identificación de los efectos geológico-ambientales generados por un sismo, los cuales pueden tener un impacto directo en la sociedad.

**Tabla 1.** Algunos de los sismos devastadores ocurridos en la historia reciente de México (Tomada de García-Carrera *et al.*, 2018).

<b>Cuadro I</b>			
<b>ALGUNOS SISMOS HISTÓRICOS EN MÉXICO</b>			
<i>Lugar o epicentro</i>	<i>Fecha</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Descripción</i>
Acambay, Edo. de México	19 - nov - 1912	6.9	Más de 100 muertos y daños importantes en edificios históricos
Acapulco, Guerrero	28 - jul - 1957	7.7	Más de 160 muertos, conocido como el sismo del Ángel debido a la caída del Ángel de la Independencia
Orizaba, Veracruz	28 - ago - 1973	7.3	Más de 600 muertos
Petatlán, Guerrero	14 - mar - 1979	7.6	Más de 5 muertos, caída de la Universidad Iberoamericana en Ciudad de México
Michoacán	19 - sept - 1985	8.1	8 000 muertos, 30 000 viviendas destruidas y más de 60 000 con daños
Colima	9 - oct - 1995	8.0	58 muertos y daños a casas y edificios
Tehuacán, Puebla	15 - jun - 1999	7.1	20 muertos y daños en 34 000 viviendas, 1 200 escuelas y 800 iglesias
Costa de Colima	21 - ene - 2003	7.6	29 muertos y más de 10 000 viviendas afectadas
Mexicali, B. C.	04 - abril - 2010	7.2	Daños en el sector eléctrico y en carreteras
Ometepec, Guerrero	20 - mar - 2012	7.4	Daños cercanos al epicentro
Petatlán, Guerrero	04 - abril - 2014	7.2	Más de 500 viviendas con daños en Guerrero, daños menores edificios públicos, hospitales y centros de salud, así como una escuela
Pijijiapan, Chiapas	07 - sept - 2017	8.2	Casi 100 muertos y cientos de viviendas y decenas de edificios colapsados
Axochiapan, Morelos	19 - sept - 2017	7.1	369 muertos, así como miles de viviendas destruidas y decenas de edificios colapsados y dañados

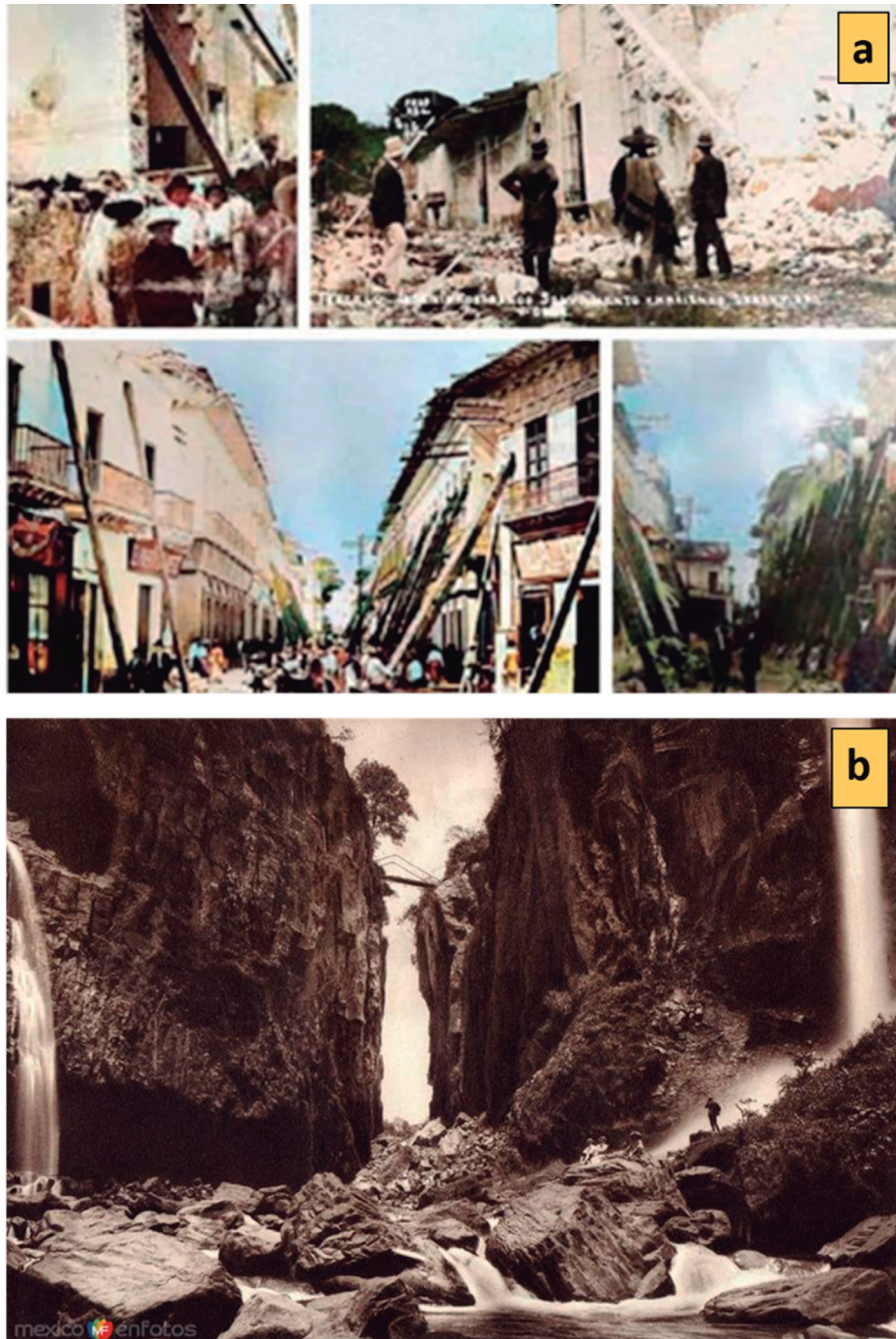
## Relevancia de los Efectos Sísmico-Ambientales

Los Efectos Sísmico-Ambientales (ESA) son a menudo, la principal causa de pérdidas materiales y humanas tras un sismo (figura 3). Después de un fuerte evento de este tipo, el levantamiento de los efectos ambientales debe ser indispensable, tanto para la mitigación del riesgo sísmico, como para la investigación.

En décadas recientes, a partir de los grandes sismos en el mundo, la investigación en geología de terremotos ha destacado el papel de los ESA en la evaluación del peligro sísmico, en relación con el tamaño del sismo y la localización de las fuentes generadoras (Guerrieri *et al.*, 2009; Gürpınar *et al.*, 2017; Serva *et al.*, 2019). La información obtenida de los efectos sísmico-ambientales constituye un recurso imprescindible para la comprensión de los eventos sísmicos y para la evaluación del peligro sísmico.

Los efectos sísmico-ambientales se pueden clasificar de forma sistemática mediante la aplicación de la escala ESI-07 (Environmental Seismic Intensity scale; Michetti *et al.*, 2007). El tipo, número y dimensión de estos efectos, proporcionan valiosa información para obtener las características macrosísmicas, caracterizar el patrón del daño y mejorar la evaluación del peligro sísmico.

El análisis de los ESA mediante la escala ESI-2007, ha permitido la caracterización del campo de intensidad macrosísmica y la obtención de parámetros de sismos pasados y recientes en diversas partes del mundo (e.g. Guerrieri *et al.*, 2009; Papanikolaou, 2011; Porfido *et al.*, 2015; Chunga *et al.*, 2018; Grützner *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2019; Naik *et al.*, 2020; Nappi *et al.*, 2021) y permite además caracterizar el comportamiento del terreno para eventos futuros. La integración de las observaciones de los efectos ambientales, evaluados con la escala ESI-07, con las evaluaciones con las escalas de intensidad tradicionales, permite una comprensión más completa del fenómeno y sus consecuencias en el territorio.



**Figura 2.** Sismo de Xalapa, Veracruz, 1920. a) Daños estructurales causados por el sismo en poblados de Veracruz. Imagen tomada de: Central Noticias – Imagen del Golfo, 2024. b) Sitio en el ambiente natural afectado por el sismo con fracturamiento y colapso de roca. Ejemplo de sismos en que se toma en cuenta solo el daño estructural, aunque el daño por EEEs fue más significativo. Imagen de Hugo Breheme, tomada de MF mexicoenfotos (2014), “Lugar del terramoto de 1920”.



**Figura 3.** Ejemplo de Efectos Sísmico-Ambientales primarios y secundarios generados por el sismo de La Cruzecita, Oaxaca de 2020. a) deslizamiento y caída de rocas; b) caída de rocas; c) agrietamiento en camino de suelo arenoso; d) deslizamiento de terreno; e) agrietamiento en camino de suelo arcilloso; f) retiro del mar de la costa, previo a la llegada del tsunami. Deformación del terreno con grietas de 200 m de longitud perpendiculares al mar; g) retiro del mar previo a la llegada de ola de tsunami; h) registro de tsunami, datos medidos (rojo) y pronóstico de marea astronómica (azul) en la estación de Huatulco, Oaxaca del SMN (2020; imagen tomada de Velázquez-Bucio *et al.*, 2023).

## Efectos Sísmico-Ambientales (ESA; Earthquake Environmental Effects - EEE)

### **Definición y clasificación**

De acuerdo con Michetti *et al.* (2007), los Efectos Sísmico-Ambientales (ESA; EEE), son todos los efectos, geológicos, hidrológicos y físicos, que un evento sísmico puede inducir en el ambiente natural. Los ESA se clasifican en dos principales categorías:

1. Efectos primarios: son la expresión en superficie de la fuente sísmica, como la superficie fallada, subsidencia o levantamiento tectónico regional.
2. Efectos secundarios: su formación depende principalmente de las características de las ondas y de las condiciones morfológicas, geológicas, climáticas y del suelo; ejemplos incluyen deslizamientos, efectos de licuefacción, grietas y fracturas.

El tipo, número y dimensión de los ESA, proporcionan valiosa información para la caracterización del patrón del daño y para mejorar la evaluación del peligro sísmico (Michetti *et al.*, 2007; Serva *et al.*, 2016).

## Escala ESI-07 (Environmental Seismic Intensity 2007)

### **Descripción de la escala y su aplicación**

La escala ESI-2007 (Michetti *et al.*, 2007), es una escala macrosísmica basada únicamente en los efectos sísmicos en el ambiente natural, creada y desarrollada por un grupo de investigadores interdisciplinario en el marco de actividades de la INQUA (International Union for Quaternary Research). Esta escala considera 12 grados de intensidad de los efectos sísmicos en el ambiente natural (figura 4) y permite comparar eventos contemporáneos y futuros con eventos históricos. Su principal ventaja es la clasificación, cuantificación y medición de características geológicas, hidrogeológicas, geomorfológicas y botánicas, asociadas a cada grado de intensidad (Serva *et al.*, 2016; Nappi *et al.*, 2017) con una alta resolución espacial, sin llegar a saturarse con valores altos de intensidad.

El análisis de los ESA, mediante la escala ESI-07 permite identificar zonas susceptibles a efectos secundarios específicos; por ejemplo, deslizamientos y licuefacción. La consideración de esta escala en el escenario de peligro sísmico es crucial para la planificación urbana, geotécnica e ingeniería estructural, análisis de riesgo, agencias de protección civil y las compañías de seguros (Serva *et al.*, 2015).

La escala ESI-07 normalmente se usa en combinación con las escalas de intensidad tradicionales para complementar el resultado de la evaluación. En la evaluación de una zona sísmica, es esencial considerar los factores regionales y locales (como la tectónica regional y las características estructurales en los efectos cosísmicos), ya que estos influirán en el “tamaño-efecto” del sismo, dependiendo sobre todo del ambiente sismo-tectónico de la región.

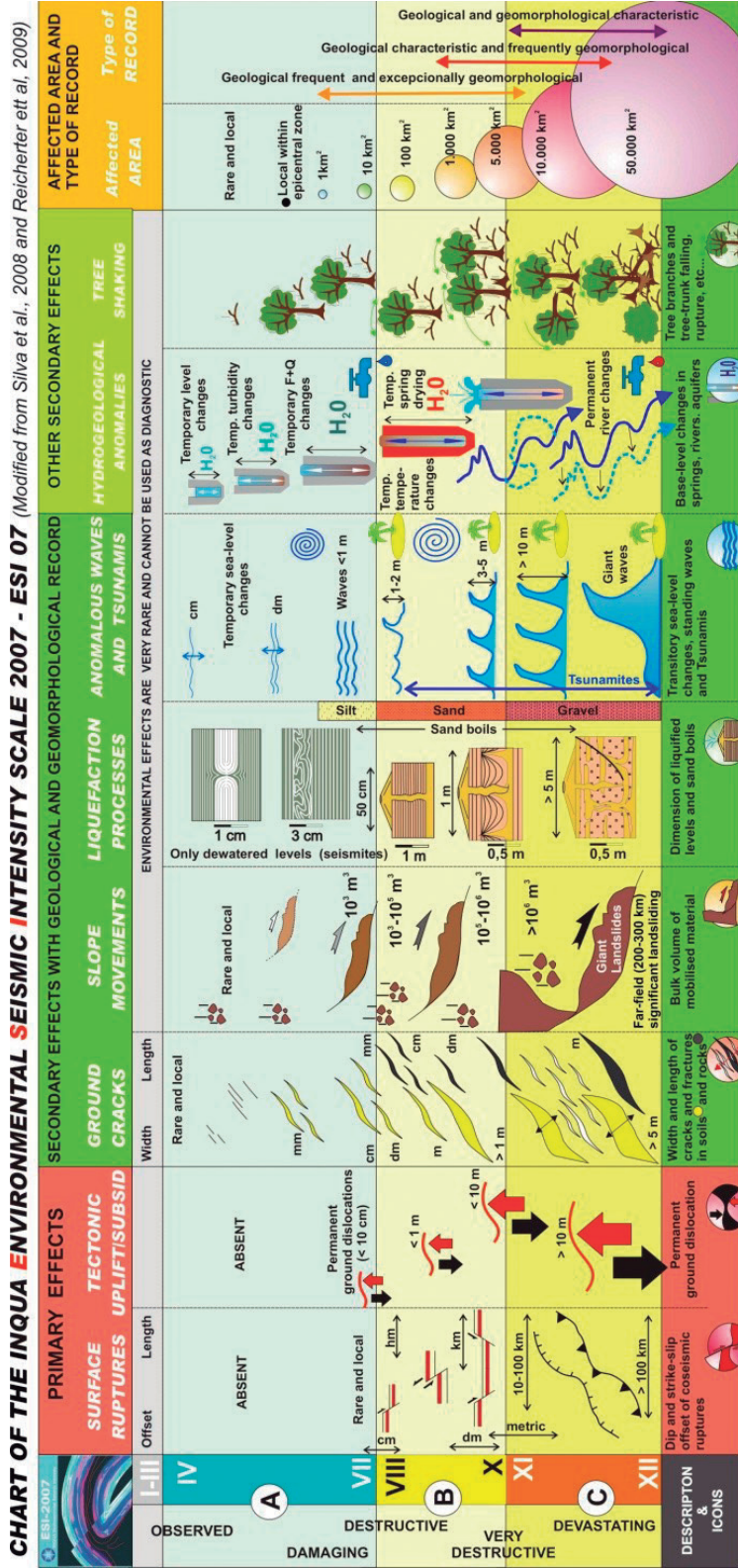


Figura 4. Tabla ilustrativa de la Escala macrosísmica de Intensidad Sísmica Ambiental ESI-07 (Michetti et al., 2007).



## Formación del Grupo de Respuesta Rápida

Un grupo de trabajo dedicado a la geología de terremotos y respuesta rápida postsísmica, puede mejorar significativamente la preparación y la capacidad de respuesta ante eventos sísmicos y la evaluación del peligro sísmico. Esto implica la colaboración estrecha entre instituciones científicas, gubernamentales y sociales integrado de manera voluntaria y comprometida, por personas con un interés compartido en la comprensión de los sismos y la reducción de sus riesgos.

### ¡México necesita de un grupo de trabajo dedicado a la respuesta rápida postsísmica!

Considerando las características geológicas, geográficas y sísmicas de México, existen varias razones para crear un grupo de trabajo dedicado a la geología de terremotos y respuesta rápida en México, entre estas:

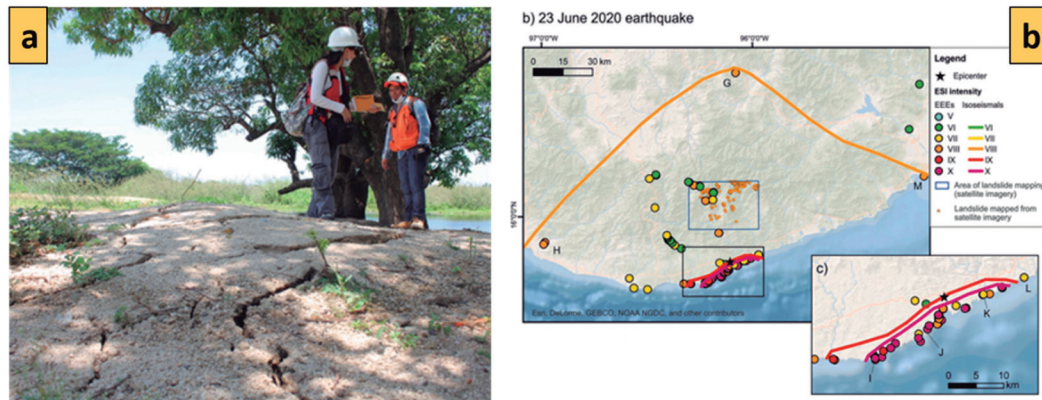
- Alta actividad sísmica: México se encuentra en una región altamente sísmica activa debido a la interacción de placas tectónicas que genera sismos con remarcable frecuencia. Esto representa una alta probabilidad de eventos sísmicos significativos que requieren una respuesta rápida y efectiva.
- Vulnerabilidad sísmica: México cuenta con una alta población y una infraestructura extensa, lo que aumenta la vulnerabilidad a los efectos de los sismos. Una respuesta rápida es esencial para proteger a las personas y limitar los daños materiales.
- Historial de terremotos significativos: México tiene un historial de sismos devastadores, como el sismo de 1985 en la Ciudad de México y los sismos de 2017 en Oaxaca y Ciudad de México. Estos eventos subrayan la necesidad de una respuesta rápida y efectiva ante futuros sismos.

En concreto, en una región altamente sísmica como México, una respuesta rápida postsísmica es crucial para:

- a. Cartografiar los efectos y analizarlos mediante el uso de la escala ESI-07 (Environmental Seismic Intensity 2007)

Detallar todos los efectos de la superficie cosísmica mediante la recopilación de datos rápida, sistemática y homogénea contribuye a obtener una imagen detallada de las complejidades de la deformación frágil de la corteza superficial y puede proporcionar información útil para describir la fuente sísmica.

La permanencia de los ESA de gran parte de los efectos en el terreno es de solo algunos días o incluso horas; su persistencia depende de factores como las condiciones climáticas o la actividad humana. Por lo tanto, es indispensable realizar el levantamiento de datos lo más pronto posible después del evento.



**Figura 5.** Levantamiento de datos cosísmicos en campo (a), para su posterior publicación cartográfica (b).

La evaluación rápida de los daños en infraestructuras, edificios, carreteras, puentes y otras instalaciones es fundamental para identificar áreas críticas que requieren atención inmediata. Esta información permite tomar medidas rápidas para evitar pérdidas humanas y reducir daños materiales. Además, la cartografía precisa de los efectos sísmicos proporciona datos valiosos que ayudan a mejorar la evaluación del riesgo sísmico y a planificar estrategias de mitigación efectivas (figura 5 y 6).

*b.* Evaluar el Riesgo residuo

La ocurrencia de un sismo conlleva más que el principal movimiento generado por la liberación de la energía. Este movimiento inicial resulta en una cascada de efectos, conocidos como *Riesgo residuo*, que representan los principales riesgos y daños al medio ambiente natural y edificado.

Tras un evento sísmico, es esencial evaluar rápidamente los peligros secundarios que pueden surgir, como réplicas, deslizamientos, hundimientos, licuefacción del suelo y tsunamis. Después de los efectos cosísmicos primarios y secundarios, la vulnerabilidad del terreno puede aumentar significativamente en sitios y condiciones específicas. Una respuesta rápida permite identificar y mitigar estos riesgos residuales, garantizando la seguridad continua de la población.

La obtención inmediata de datos geológicos, hidrológicos y ambientales en el período posterior al sismo es fundamental para la toma de decisiones informadas (figura 6). Los datos actualizados respaldan la planificación de la respuesta de emergencia y la implementación de estrategias efectivas para proteger a la población y los recursos. La valoración del riesgo residual, implica identificar y evaluar áreas expuestas después de un levantamiento de datos rápido, lo que ayuda a prever la evolución de los posibles efectos y determinar la intervención estructural y no estructural necesaria para mitigar el riesgo (Marsan y Corazza, 2024).

Una respuesta rápida postsísmica permite tomar medidas inmediatas para proteger a la población, como la evacuación de áreas de alto riesgo, el suministro de atención médica a los heridos y la distribución de suministros de emergencia. Además, ayuda a reducir las pérdidas económicas al salvaguardar la infraestructura crítica y los recursos productivos. La gestión inmediata de la emergencia también sienta las bases para la planificación a largo plazo de la recuperación y la reconstrucción.

## ¿Cómo puede mejorar la capacidad de México para enfrentar terremotos, mediante la creación de un Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica?

La existencia de un grupo de Respuesta Rápida Postsísmica en México, que cuente con la colaboración estrecha entre grupos de instituciones científicas, gubernamentales y sociales emergencia de Protección Civil y el Ejército Mexicano, fortalecerá significativamente la capacidad del país para responder de manera eficaz a eventos sísmicos de gran magnitud. La estructura organizativa bien coordinada, con capacidad de respuesta y recursos adecuados, permitirá mitigar riesgos, salvar vidas y acelerar la recuperación.



**Figura 6.** La recolección inmediata de los efectos sísmico - ambientales apoyan la planificación de la respuesta a la emergencia. La evaluación de riesgo residuo tras el levantamiento rápido permite la prevención de la posible evolución de efectos y las intervenciones necesarias para mitigar el riesgo.

## Objetivos del Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica

El objetivo general del grupo es llevar a cabo el levantamiento de datos y la evaluación geológico-ambiental en el período inmediatamente posterior a un sismo.

A partir de ello, como objetivos particulares, se tiene:

- Despliegue del grupo de trabajo al área afectada.
- Actuar conforme a un protocolo común para la recopilación de datos geológicos, geomorfológicos, sísmico-ambientales, estructurales, y otros relacionados a efectos provocados por el sismo, idealmente en colaboración con el Sistema Nacional de Protección Civil y el Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Manejo y evaluación de los datos de levantamiento cosísmico, así como la creación y actualización de una base de datos. Por ejemplo, ver el catálogo promovido por INQUA y gestionado por ISPRA, la agencia medioambiental nacional de Italia (Baiocco, s. f.; Guerrieri *et al.*, 2015). Además, la publicación científica de estos datos y la transmisión de la información a las instituciones de protección civil y organismos de interés social.

## Composición y perfil de los integrantes del grupo

El grupo de Respuesta Rápida Postsísmica se compone por investigadores y estudiantes de ciencias de la Tierra, geólogos, sismólogos, ingenieros, así como por miembros del Departamento de Protección Civil, todos ellos interesados en el estudio de la geología de terremotos y en la reducción del peligro y riesgo sísmico (figura 7). Cuando un gran número de científicos de la tierra, geólogos, ingenieros, biólogos, interesados en la geología de los sismos, colaboran compartiendo un enfoque similar, seleccionando las diferentes áreas de investigación, utilizando protocolo de campo comúnmente aceptada para la recopilación de datos cosísmicos, es posible llevar a cabo *una evaluación sísmica completa y confiable*.

Los integrantes del grupo están comprometidos en contribuir en la intervención en situaciones de emergencia con sus competencias profesionales, actuando con autonomía científica y operativa.

## Estructura y responsabilidades de los miembros del grupo

La estructura de organización del grupo se compone por:

- a. Comité de Coordinación, y
- b. Contactos sede



**Figura 7.** El Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica requiere de la colaboración entre instituciones universitarias, gubernamentales y sociales para la mejor intervención en situaciones de emergencia

El *Comité de Coordinación* estará integrado por miembros del grupo, con un representante de cada zona sísmica del país. Este comité será responsable de coordinar las actividades tanto en periodos ordinarios de planificación como durante situación de emergencia.

El Comité de Coordinación se encargará de ejecutar las acciones necesarias para cumplir con los objetivos del Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica. Esto incluye la organización de convenciones, la búsqueda de cooperaciones y convenios, la realización de actualizaciones, la programación de reuniones, entre otras actividades. Además, será responsable de mantener actualizada una página web u otro medio de comunicación y contacto del grupo.

En caso de emergencia, el comité coordinador informa a los miembros del grupo, proporcionando la logística necesaria para la intervención en campo (instrumentación, movilidad, alojamiento, contacto con autoridades locales y cuerpos de emergencia, comunidad local, etc.), en coordinación con la sede más cercana al área epicentral.

Los *contactos sede*. Cada zona sísmica contará con una sede representada por el miembro que será, a su vez, miembro del Comité de organización, junto con un sub-representante. Estos roles se rotarán periódicamente, con el fin de garantizar la participación activa y equitativa de todos los miembros del grupo.

Los contactos sede, tendrán la responsabilidad de mantener la comunicación entre los miembros de su zona y el comité coordinador. En caso de emergencia, serán responsables de informar y organizar a los participantes, así como de establecer contacto con las autoridades locales para facilitar la colaboración conjunta y coordinada.

## Metodología y herramientas de capacitación

La preparación ante la emergencia sísmica necesita de preparación por parte de los integrantes del grupo de Respuesta Rápida Postsísmica (figura 8). Este proceso requiere de la realización de actividades como: a) cursos, b) talleres y c) foros organizados por el comité de coordinación en contacto con el contacto sede de cada zona sísmica. Es fundamental promover la participación activa de los integrantes, tanto en la asistencia como en la impartición de capacitaciones, enfocadas en la recopilación de datos según la especialidad de cada miembro.

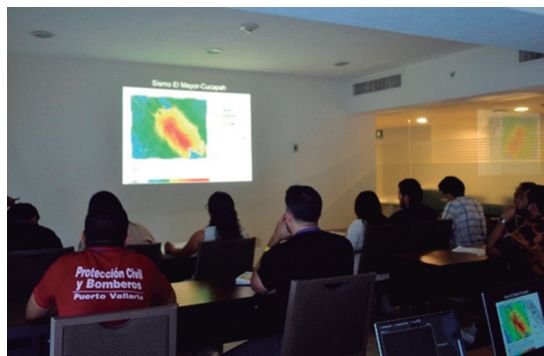
- a. *Los cursos* se enfocan en proporcionar conocimientos teóricos y prácticos sobre la forma como abordar las actividades tanto de campo como de gabinete cuando se presente un sismo, y están orientados a la toma de datos especializados en diversas áreas.
- b. *Los talleres*, por su parte, son actividades cortas enfocadas a temas específicos (por ejemplo, geología estructural, sismología, biomarcadores, ESAs), y están destinados a profundizar en la capacitación técnica de los participantes.
- c. Finalmente, los *foros* facilitan la consolidación y actualización constante del grupo, permitiendo la revisión y coordinación de actividades con instituciones universitarias, gubernamentales, y de carácter privado y social.

La combinación de estas metodologías y herramientas con un enfoque teórico-práctico y actividades de campo, asegura que el grupo esté preparado para responder de manera eficiente en cualquier momento a los desafíos de un evento sísmico.

## Protocolo de respuesta rápida

### *Fases del Protocolo*

Después del registro de un evento sísmico relevante, se activa el grupo de acuerdo a su previa organización y capacitación. Las actividades ante la emergencia, se pueden esquematizar, de manera sintética, en cuatro fases principales:



**Figura 8.** Curso para la formación del Grupo Nacional de Respuesta Rápida Postsísmica, durante la RAUGM 2023, en Puerto Vallarta, Jal.

- Fase 1. *Activación del protocolo*. En las primeras 24 horas hasta el inicio de la fase 2, las principales actividades involucran la recopilación de la información preliminar sobre el sismo y el área afectada, organización para el despliegue de los equipos en campo, distribución de material cartográfico y digital a partir de una base centralizada.
- Fase 2. *Intervención en la zona epicentral*. Comprende la preparación de los recopiladores que iniciarán la inspección en las primeras 48 horas y hasta que termine la emergencia. De acuerdo con las características del sismo, se define y asigna el área a inspeccionar, con ayuda del material documental y cartográfico disponible. Se asegura la comunicación con la coordinación y el contacto sede para envío e intercambio de información actualización de datos y cuestiones logísticas para el trabajo en campo.
- El equipo en campo inspecciona y recopila los datos relacionados a deformaciones cósmicas en superficie mientras que el grupo de la coordinación gestiona y actualiza la base de datos. Se mantiene la comunicación con el Servicio Sismológico Nacional.
- Fase 3. *Difusión de datos durante la fase de emergencia*. En esta fase, el Comité Coordinador en la sede central recopila y sintetiza los primeros informes de los datos de campo y se elaboran informes oficiales y técnicos para las instituciones y autoridades. Estos informes serán la base para la redacción del informe final y la publicación de los resultados.
- Fase 4. *Difusión de datos post-emergencia*. Después de la emergencia, es esencial elaborar y publicar un informe final como un artículo científico, reporte o contribución. El análisis integral de los datos geológicos, sísmico-ambientales y estructurales evaluados mediante la escala ESI-07 y otras escalas de intensidad tradicionales, y su posterior publicación científica, contribuye significativamente en la mejora de la evaluación del peligro sísmico.

Los tiempos establecidos para la utilización de los datos, así como la modalidad de su publicación se establecen por los propios integrantes del grupo, garantizando así el manejo adecuado y coordinado de la información recopilada.

El documento del protocolo está basado en el protocolo de operación del Grupo de trabajo EMERGE (EMERGE, s. f.), ahora EuQuaGe (INGVterremoti, s. f.), el cual atiende emergencias postsísmicas en la región europea.

## **Impacto de la respuesta rápida**

La consolidación del Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica en México tiene el potencial de mejorar significativamente la capacidad del país para enfrentar sismos, con beneficios tangibles en diversos aspectos:

### ***Beneficios para la comunidad científica y la sociedad en general***

La colaboración directa en proyectos de investigación de diversas universidades e instituciones, centrados en el análisis y la evaluación de los efectos sísmico-ambientales, y la cooperación con otros grupos de levantamiento de efectos sísmicos nacionales e internacionales, que poseen am-

plia experiencia en eventos sísmicos significativos, fortalecerá la evolución y el desempeño del grupo mexicano. Estos beneficios se reflejarán en el trabajo de campo, el análisis y la comunicación de los resultados en situaciones de emergencia, que constituyen el objetivo principal de este proyecto.

El trabajo coordinado del grupo generará beneficios concretos, como la recopilación de datos geológicos, geomorfológicos, sísmico-ambientales, estructurales; la elaboración de mapas detallados; la publicación en reportes, informes y revistas científicas; y la transmisión de la información a las instituciones de protección civil y organismos de interés social. Además, la creación de una base de datos será fundamental para apoyar en la preparación y respuesta de futuros eventos sísmicos.

### ***Mejoras en la evaluación del peligro sísmico y la gestión de emergencias***

Las acciones del Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica podrán tener un impacto inmediato en la evaluación de daños, lo que permitirá la toma de decisiones de manera efectiva. Esto incluye la priorización de recursos, la identificación y mitigación de riesgos residuales, la coordinación entre agencias gubernamentales y cuerpos de rescate, la provisión rápida de ayuda humanitaria en la organización eficiente de evacuaciones y asistencia médica (figura 9).

Además, el trabajo del grupo puede ser sumamente valioso para abordar diversas problemáticas nacionales.

A continuación, se mencionan algunas formas en las que puede contribuir:

- Investigación y monitoreo. Participación en proyectos de investigación que se enfoquen en el monitoreo sísmico y la evaluación de riesgos. Esto puede ayudar a identificar áreas vulnerables y desarrollar estrategias de mitigación.
- Educación y capacitación. Organización de talleres y programas educativos para comunidades y profesionales sobre la participación ciudadana en el registro de efectos sísmico-ambientales.
- Colaboración interdisciplinaria. Trabajar con otros científicos y profesionales en proyectos que integren la sismología, la geología, la geografía, la ingeniería civil y la planificación urbana. Esto puede mejorar la resiliencia de las infraestructuras y comunidades.
- Asesoría. Ofrecer servicios como asesor para gobiernos y organizaciones que necesiten desarrollar políticas y planes de acción para la gestión de riesgos sísmicos.
- Difusión de información. Ayudar a difundir información sobre la importancia de los efectos sísmico-ambientales y las medidas de seguridad a través de medios de comunicación, redes sociales y eventos comunitarios.

Resumen de los beneficios de una respuesta rápida:

1. Protección de vidas humanas. Una respuesta rápida permite la evacuación inmediata de áreas de alto riesgo, el suministro de atención médica a los heridos y la distribución de suministros de emergencia.
2. Reducción de daños materiales. Identificar áreas críticas y tomar medidas preventivas ayuda a salvaguardar la infraestructura crítica y los recursos productivos.



3. Mitigación de riesgos secundarios. Evaluar y abordar los peligros secundarios minimiza el riesgo de desastres adicionales.
4. Planificación para la recuperación. Establece una base sólida para la planificación a largo plazo de la recuperación y la reconstrucción.
5. Toma de decisiones informada. La recopilación de datos precisos y actualizados respalda la toma de decisiones efectivas y basadas en evidencia.



**Figura 9.** Los beneficios de contar con un Grupo de Respuesta Rápida Postsísmica incluyen la capacidad de actuar con prontitud y contar datos precisos para enfrentar los desafíos como la priorización de recursos, la identificación y mitigación de riesgos residuales, la coordinación entre agencias gubernamentales y cuerpos de rescate, la provisión rápida de ayuda humanitaria en la organización eficiente de evacuaciones y asistencia médica.

## Conclusiones

La formación de un grupo nacional de intervención rápida postsísmica, es esencial para mejorar la capacidad de respuesta de México ante desastres naturales provocados por los sismos. Este grupo, con una metodología unificada, desde la recopilación de datos hasta la publicación, mejoraría significativamente la coordinación y el intercambio de información en el campo de la geología sísmica. Además, permitiría avanzar en el conocimiento de estos eventos, reducir sus impactos negativos y proteger el bienestar social.

En resumen, una respuesta rápida postsísmica por parte de un grupo organizado, es crucial para proteger vidas, reducir daños materiales, minimizar riesgos y garantizar una recuperación efectiva. La capacidad de actuar con prontitud y basarse en datos precisos es esencial para enfrentar los desafíos de un desastre sísmico de manera eficiente.

La invitación está abierta y la dirección de contacto es: [magda\\_vb@yahoo.com.mx](mailto:magda_vb@yahoo.com.mx)

## Bibliografía

- Baiocco, A. S. F. (s. f.). *EEE - Earthquake Environmental Effects Catalogue*. <http://eeecatalogue.isprambiente.it/viewer.php#>
- Chunga, K., Livio, F., Mulas, M., Ochoa-Cornejo, F., Besenzon, D., Ferrario, M.F., Michetti, A.M. (2018). Earthquake Ground Effects and Intensity of the 16 April 2016 Mw 7.8 Pedernales, Ecuador, Earthquake: implications for the source characterization of large subduction earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (6), 3384–3397.
- EMERGEEO. (s. f.). <https://emergeo.ingv.it/>.
- García-Carrera J.S., Mena-Hernández U., Bermúdez-Alarcón F.J. (2018, 29 enero). El terremoto 19S en Morelos: la experiencia operativa del INEEL en la evaluación del riesgo estructural. *Salud Publica de México*. <https://www.saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/9408/11478>
- Grotzinger, J.P., Jordan, T.H. (2016). *Capire la Terra*. Terza edizione italiana condotta sulla settima edizione americana. *Zanichelli*. ISBN: 978-8808821232 <https://www.zanichelli.it/ricerca/prodotti/capire-la-terra-grotzinger-jordan>
- Grützner, C., Walker, R., Ainscoe, E., Elliott, A., Abdrakhmatov, K. (2019). Earthquake environmental effects of the 1992 Ms 7.3 Suusamyrdarya earthquake, Kyrgyzstan, and their implications for Paleo-earthquake studies. *Geosciences*, 9(6), 271.
- Guerrieri, L., Michetti, and Silva, P. G. (2015). *EEE Catalogue: A Global Database of Earthquake Environmental Effects* in M. Beer, I. A. Kougioumtzoglou, E. Patelli, and S.-K. Au (Eds.), *Encyclopedia of Earthquake Engineering* (pp. 932-944). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi 10.1007/978-3-642-36197-5\_32-1
- Guerrieri, L., Blumetti, A.M., Esposito, E., Michetti, A.M., Porfido, S., Serva, L., Tondi, E. and Vittori, E. (2009). Capable faulting, environmental effects and seismic landscape in the area affected by the 1997 Umbria–Marche (Central Italy) seismic sequence. *Tectonophysics*, 476(1–2), 269–281.
- Gürpınar, A., Serva L., Livio F., Rizzo P. C. (2017). Earthquake-induced crustal deformation and consequences for fault displacement hazard analysis of nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 311, 69–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.11.007>.
- INGVterremoti. (s. f.). *EUQUAGE – INGVTerremoti*. <https://ingvterremoti.com/tag/euquake/>
- Marsan y Corazza, (2024). The emergency management of earthquake induced phenomena: the cases of earthquakes occurred in Abruzzo (2009), in Emilia-Romagna (2012) and in Central Italy (2016-2017), *Geologia dell'Ambiente* • Supplemento al n. 1/2018, 45-57, ISSN 1591-5352, <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sigeaweb.it/documenti/gda-supplemento-1-2018.pdf>
- MF mexicoenfotos (2014). Terremoto del 3 de enero de 1920. Recuperado el 10 de agosto del 2024 de <https://www.mexicoenfotos.com/antiguas/veracruz/teocelo/lugar-del-terremoto-de-1920-cerca-de-xalapa-MX14118335810153>

- Michetti, A.M., Esposito, E., Guerrieri, L., Porfido, S., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Aude-mard, F., Azuma, T., Clague, J., Comerci, V., Gürpınar, A., McCalpin, J., Mohammadioun, B., Mörner, N.A., Ota, Y., Roghazin, E. (2007). *Environmental seismic intensity scale 2007 - ESI 2007*. Mem. Descr. 11a Carta Geol. Italia, 74, 7–54. Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Roma, Italy. [http://www.isprambiente.gov.it/en/publications/technical-periodicals/descriptive-memories-of-the-geological-map-of/intensity-scale-esi-2007?set\\_language=en](http://www.isprambiente.gov.it/en/publications/technical-periodicals/descriptive-memories-of-the-geological-map-of/intensity-scale-esi-2007?set_language=en).
- Naik, S.P., Mohanty, A., Porfido, S., Tuttle, M., Gwon, O., Kim, Y.S. (2020). Intensity estimation for the 2001 Bhuj earthquake, India on ESI-07 scale and comparison with historical 16th June 1819 Allah Bund earthquake: a test of ESI-07 application for intraplate earthquakes. *Quaternary International*, 536, 127–143.
- Nappi, R., Gaudiosi, G., Alessio, G., De Lucia, M., & Porfido, S. (2017). The environmental effects of the 1743 Salento earthquake (Apulia, southern Italy): A contribution to seismic hazard assessment of the Salento Peninsula. *Natural Hazards*, 86, 295–324. DOI 10.1007/s11069-016-2548-x
- Nappi, R., Porfido, S., Paganini, E., Vezzoli, L., Ferrario, M.F., Gaudiosi, G., ...& Michetti, A.M. (2021). The 2017, MD= 4.0, Casamicciola earthquake: ESI-07 scale evaluation and implications for the source model. *Geosciences*, 11 (2), 44.
- Papanikolaou, I.D. (2011). Uncertainty in intensity assignment and attenuation relationships: how seismic hazard maps can benefit from the implementation of the Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007). *Quaternary International*, 242, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.03.058>.
- Porfido, S., Esposito, E., Spiga, E., Sacchi, M., Molisso, F., & Mazzola, S. (2015). Impact of ground effects for an appropriate mitigation strategy in seismic area: the example of Guatemala 1976 earthquake. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes* (pp. 703-708). Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3\_117.
- Rivera, L. (2023). Central Noticias Imagen del Golfo. Sismo de 1920 en Xalapa: cuando la catástrofe paralizó la ciudad. *Imagen del Golfo*. Recuperado el 05 de agosto del 2024 de <https://imagedelgolfo.mx/xalapa/veracruz-sismo-de-1920-cuando-catastrofe-paralizo-xalapa/50434435>
- Serva, L. (2019). History of the Environmental Seismic Intensity Scale ESI-07. *Geosciences*, 9, 210.
- Serva, L., Vittori, E., Comerci, V., Esposito, E., Guerrieri, L., Michetti, A.M., Mohammadioun, C., Porfido, S., Tatevossian, R.E. (2016). Earthquake hazard and the environmental seismic intensity (ESI) scale. *Pure and Applied Geophysics*, 173 (5), 1479–1515. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1177-8>.
- Silva, P.G., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner Robles, J.L., Élez, J., Pérez-López, R., Dávila, M.B.B. (2019). Catalogue of the geological effects of earthquakes in Spain based on the ESI-07 macroseismic scale: a new database for seismic hazard analysis. *Geosciences*, 9, 334.

- SSN (2024). Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado el 29 de Julio, 2024 de <http://www.ssn.unam.mx/>
- Suárez, G., y Albin, P. (2009). Evidence for great tsunamigenic earthquakes (M 8.6) along the Mexican subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99 (2A), 892–896. <https://doi.org/10.1785/0120080201>.
- Suárez, G., V. García-Acosta (2021). The First Written Accounts of Pre-Hispanic Earthquakes in the Americas. *Seismological Research Letters*, 92, 3856–3864. doi: 10.1785/0220210161.
- Velázquez-Bucio M.M., Ferrario M.F., Muccignato E., Porfido S. Sridharan A., Chunga K., Livio F., Gopalan S., Michetti A.M. (2023). Environmental effects caused by the Mw 8.2, September 8, 2017, and Mw 7.4, June 23, 2020, Chiapas-Oaxaca (Mexico) subduction events: Comparison of large intraslab and interface earthquakes. *Quaternary International*, 651, 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.11.028>.

# La antropización de la cobertura vegetal de los paisajes físico-geográficos de la cuenca del río Armería en el estado de Colima

María del Carmen Gardenia Jiménez-Velázquez<sup>1</sup>,  
Horacio Morales-Iglesias<sup>2\*</sup>, Luis Miguel Espinosa-Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>El Colegio Mexiquense A.C.

<sup>2</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

<sup>3</sup>Universidad Autónoma del Estado de México

\*horacio.morales@unicach.mx

## Resumen

En la actualidad, la degradación de los paisajes naturales se reconoce como una problemática ambiental que afecta a la humanidad, debido a que vulnera el equilibrio ecológico. La presente investigación evaluó los niveles de transformación que presenta la cobertura vegetal de los paisajes físico-geográficos que conforman la cuenca del río Armería en el norte del estado de Colima a escala 1:50 000. Para lograr esta meta se aplicó el índice de antropización de la cobertura vegetal.

Los resultados indican que los niveles altos de antropización de la cobertura vegetal ocupan casi la mitad de la superficie de la cuenca -44%-, mientras que las categorías bajas abarcan poco más de un tercio de esta -37%-, por su parte, la clase media representa un área menor a la anterior -19%-. En este sentido, las categorías más elevadas se encuentran asociadas a paisajes de piedemonte volcánico y valles de origen fluvial; en cambio, los niveles más bajos se establecen en paisajes montañosos de origen tectónico-kárstico y tectónico intrusivo.

La presente investigación fortalece el conocimiento geográfico de la región; además, es útil en el campo de planificación territorial debido a que permite orientar los esfuerzos de restauración ecológica en la cuenca para evitar posibles escenarios de riesgo por inestabilidad de laderas.

**Palabras clave:** Paisaje físico-geográfico, antropización, cobertura vegetal, río Armería, Colima.

## Introducción

A nivel mundial, los fenómenos socioeconómicos que transforman el territorio –crecimiento urbano, avance de la frontera agrícola, cambios de uso de suelo, migraciones– han generado procesos de degradación en los paisajes naturales, estos impactos son notables para la humanidad porque comprometen la calidad de vida de las futuras generaciones (Assessment, 2003). En México, estos cambios han generado una pérdida de bio y geodiversidad, así como una disminución en cantidad y calidad de los servicios ambientales para la población local (Bocco *et al.*, 2010; Bollo *et al.*, 2014).

Es importante mencionar que en el país existe poca información sobre los niveles de deterioro que presentan los componentes bióticos – flora y fauna– (De la Lanza-Espino, 2019); sin embargo, en las últimas décadas la sociedad ha fomentado un desarrollo económico regulado por instrumentos de planificación territorial, que a través de un proceso de evaluación –etapa de diagnóstico– permite conocer los niveles de alteración que presentan los paisajes naturales que integran el territorio (Sánchez *et al.*, 2013).

En el marco de los procesos de evaluación ambiental, Priego-Santander *et al.* (2004) y Rose-te-Vergés *et al.* (2014) señalan que la cobertura vegetal es el componente más significativo de un paisaje físico-geográfico (PFG) debido a que indica de manera sintética el grado de transformación geocológica; en este sentido, la antropización de la cobertura vegetal en la zona de estudio puede ser un factor detonante para iniciar procesos de remoción en masa y generar un escenario de riesgo (Morales, *et al.*, 2019), debido a las condiciones morfogénicas predominantes –relieve volcánico–.

Con la finalidad de conocer los niveles de transformación y la organización espacial de estos en la cuenca del río Armería, la presente investigación evaluó bajo los principios teórico-metodológicos de la geoecología del paisaje los niveles de antropización que presenta la cobertura vegetal de los PFG, para lograr esta meta se aplicó el índice de Shishenko (1988) adaptado para la realidad mexicana por Priego-Santander *et al.* (2004) a la propuesta cartográfica de Jiménez-Velázquez (2024).

De acuerdo con lo anterior, la geoecología del paisaje se distingue por analizar desde una perspectiva holística, sistémica y dialéctica los cambios antropogénicos de los paisajes naturales y las respuestas de estos a dichas transformaciones (Mateo y Ortiz, 2001; Bollo-Manent y Martínez-Serrano, 2023); en el marco de estas consideraciones, actualmente la geoecología del paisaje constituye una propuesta sólida para la gestión del territorio.

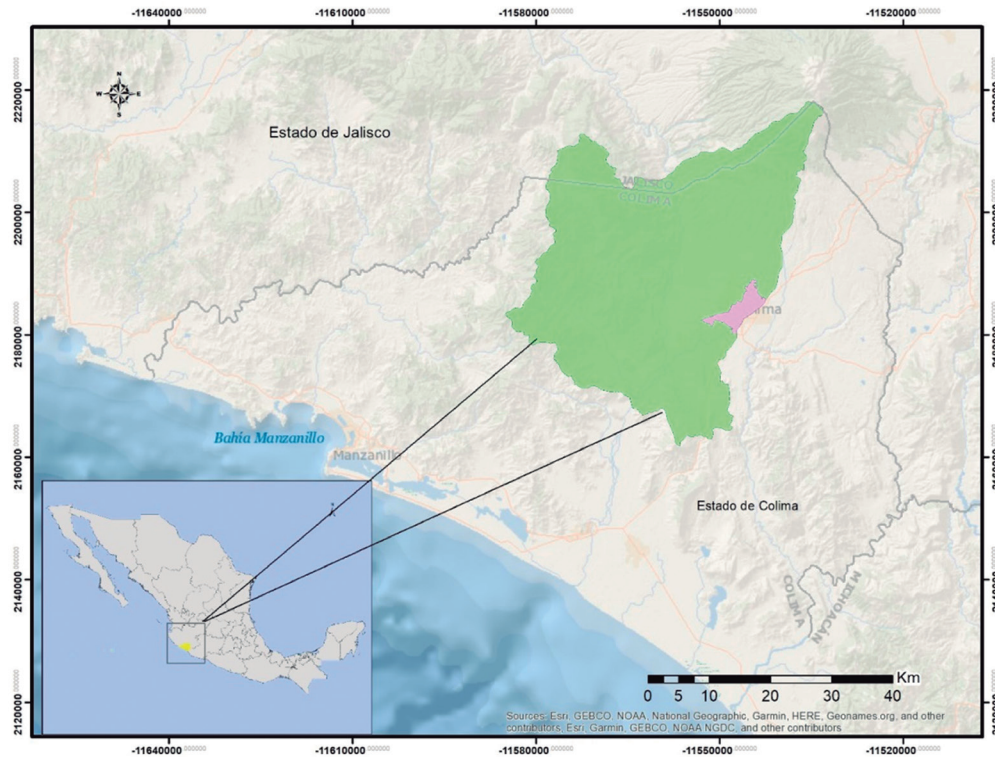
Desde esta perspectiva geográfica, el PFG es un sistema territorial compuesto por elementos naturales y antropogénicos condicionados socialmente, que modifican las propiedades de los paisajes naturales originales (Mateo, 2002) y constituye la unidad espacial de análisis; donde, el componente geólogo-geomorfológico juega un papel preponderante en la estructura, función, dinámica de este (Priego-Santander *et al.*, 2004; Bollo-Manent y Martínez-Serrano, 2023)

Respecto a la degradación de los PFG, esta se entiende como la combinación de objetos de índole ambiental que se presentan en procesos que desarticulan la estructura y el funcionamiento de estos, debido a las acciones transformadoras de la sociedad a las que se encuentran sujetos (Mateo y Ortiz, 2001; Manent y Fernández, 2020).

## Método

### *Área de estudio*

La presente investigación se realizó en la cuenca del río Armería, que se ubica al norte del estado de Colima bajo las siguientes coordenadas extremas: 18° 51'50" latitud norte y 130° 58'07" longitud oeste. Esta unidad hidrográfica ocupa un área de 2, 208 km<sup>2</sup> y se distribuye en un amplio rango altitudinal -3,960-500 m.s.n.m- por los municipios de Comala, Villa de Álvarez, Minatitlán, Coquimatlán y Colima (ver figura 1).



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca del río Armería en el estado de Colima. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

Para evaluar el grado de modificación antropogénica de la cobertura vegetal de la cuenca del río Armería, se utilizó el índice de antropización de la cobertura vegetal (IACV), establecido por Shishenko (1988), que ha sido aplicado de manera frecuente en México (Priego-Santander *et al.*, 2004; Ríos, 2018; Morales-Iglesias *et al.*, 2019; Cruz-Peralta y Ramírez-Sánchez, 2023). Este indicador se expresa bajo la siguiente ecuación:

$$IACV = \frac{\sum_{i=1}^n r_i * A_{ij}}{A_j}$$

Donde:

IACV = Índice de antropización de la cobertura vegetal del paisaje.

$r_i$  = Grado de transformación antropogénica de los paisajes del tipo  $i$  de utilización.

$A_{ij}$  = Área dedicada al tipo de utilización en el geocomplejo.

$A_j$  = Área de la unidad de paisaje.

Para lograr este objetivo, se utilizó el mapa de paisajes físico-geográficos y vegetación y uso de suelo de la cuenca del río Armería a escala 1:50,000 propuesta por Jiménez-Velázquez (2024).

De acuerdo con Shishenko (1988), las diversas tipologías del uso de suelo y vegetación determinan los distintos niveles de transformación de la cobertura vegetal de los PFG; en este sentido, cada una de estas es ponderada en escala de 0.01 a 0.99, donde, los valores asignados a las clases consideran el estado sucesional de la vegetación (Quesada, *et al.*, 2009) y los grados de modificación antropogénica del uso de suelo; por tanto, las ponderaciones más altas indican un mayor nivel de antropización y las más bajas representan un menor grado (tabla 1).

Para obtener los valores de antropización de la cobertura vegetal en cada unidad de PFG se establecieron los siguientes pasos:

- En el primer paso se multiplicó el valor de ponderación por el área que ocupa cada tipo de vegetación o uso de suelo; después se realizó una sumatoria de los resultados obtenidos.
- En un segundo procedimiento se dividió el producto anterior entre el área total que ocupa la unidad de PFG.
- Con base a los resultados obtenidos, se generaron cinco categorías (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo) según el método de cortes naturales (*natural breaks*) (tabla 2). Este procedimiento agrupa los valores más similares entre sí y maximiza las diferencias entre las clases (Métodos de Clasificación de datos—ArcGIS Pro | Documentación, s. f.).

**Tabla 1.** Valores de ponderación según los tipos de vegetación y uso de suelo.

Fuente: Tomado y modificado de Morales-Iglesias *et al.* (2019).

Tipos de vegetación (INEGI)		Ponderación bajo el IACV
Vegetación primaria	Bosque	0.01
	Selva	0.01
	Manglar (VM) Popal (VA) Pradera de alta montaña (VW) Sabana (VS) Sabanoide (VSI) Tular (VT) Vegetación de dunas costeras (VU) Vegetación de galería (VG)	
	Bosque	0.2



Tipos de vegetación (INEGI)		Ponderación bajo el IACV	
Vegetación secundaria arbórea	Selva	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta perennifolia (VSA/SAP)</li> <li>Baja caducifolia (VSA/SBC)</li> <li>Baja espinosa caducifolia (VSA/SBQ)</li> <li>Mediana subcaducifolia (VSA/SMS)</li> <li>Mediana subperennifolia (VSA/SMQ)</li> </ul>	
	Manglar (VSA/VM)		
Vegetación secundaria arbustiva	Selva	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta perennifolia (VSA/SAP)</li> <li>Baja caducifolia (VSA/SBC)</li> <li>Baja espinosa caducifolia (VSA/SBQ)</li> <li>Mediana subcaducifolia (VSA/SMS)</li> <li>Mediana subperennifolia (VSA/SMQ)</li> </ul>	0.3
	Manglar (VSA/VM)		
Vegetación secundaria herbácea	Bosque	<ul style="list-style-type: none"> <li>Encino (VSh/BQ)</li> <li>Pino-Encino (VSh/BPQ)</li> <li>Mesófilo de Montaña (VSh/BM)</li> </ul>	0.4
	Selva	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baja caducifolia (VSh/SBC)</li> </ul>	
Uso de suelo	Pastizales	Inducido (PI)	0.60
		Cultivado (PC)	0.70
	Bosque	Cultivado (BC)	0.70
	Palmar	Inducido (VPI)	0.60
	Agricultura	Temporal (AT)	0.80
		Riego (AR)	0.85
	Asentamientos humanos (AH)		0.90
Zona urbana (ZU)		0.99	

**Tabla 2.** Definición de los grados de antropización de la cobertura vegetal de los paisajes. CACV: Grado de Antropización de la Cobertura Vegetal. Fuente: Tomado y modificado de Ramírez-Sánchez *et al.* (2022).

CACV	Rango del IACV	Definición
Muy bajo	$IACV \leq 0.20$	Paisajes que mantienen una cobertura vegetal en estado natural y/o seminatural en más del 90% de su extensión. Menos de 10% se utiliza en actividades agrícolas y pecuarias. No se encuentran asentamientos urbanos.
Bajo	$0.20 < IACV < 0.40$	Paisajes que sostienen una cobertura vegetal natural y/o seminatural en más del 55-60% de su área. Menos del 10% se aprovecha en actividades agrícolas, mientras que las actividades pecuarias hasta en 25%. No se encuentran componentes antrópicos como asentamientos urbanos.
Medio	$0.41 < IACV < 0.60$	Paisajes que sustentan una cobertura vegetal natural y/o seminatural en más del 15-20%. Existe dominancia de actividades agropecuarias hasta en 80% de la superficie. Presencia de 5% de asentamientos humanos.

CAVC	Rango del IACV	Definición
Alto	$0.61 < IACV < 0.80$	Paisajes que cuentan con cobertura vegetal natural y/o seminatural en más del 2-3% del territorio. Más de 87% se emplea para las actividades agropecuarias. Se encuentran asentamientos urbanos hasta en 7% de la extensión del paisaje.
Muy alto	$IACV \geq 81$	Paisajes que mantienen su cobertura vegetal en estado natural y/o seminatural en menos del 0.5% de su superficie. Es dominado por actividades agropecuarias en 60% del territorio, mientras que asentamientos humanos hasta 38-40% de los paisajes.

## Resultados

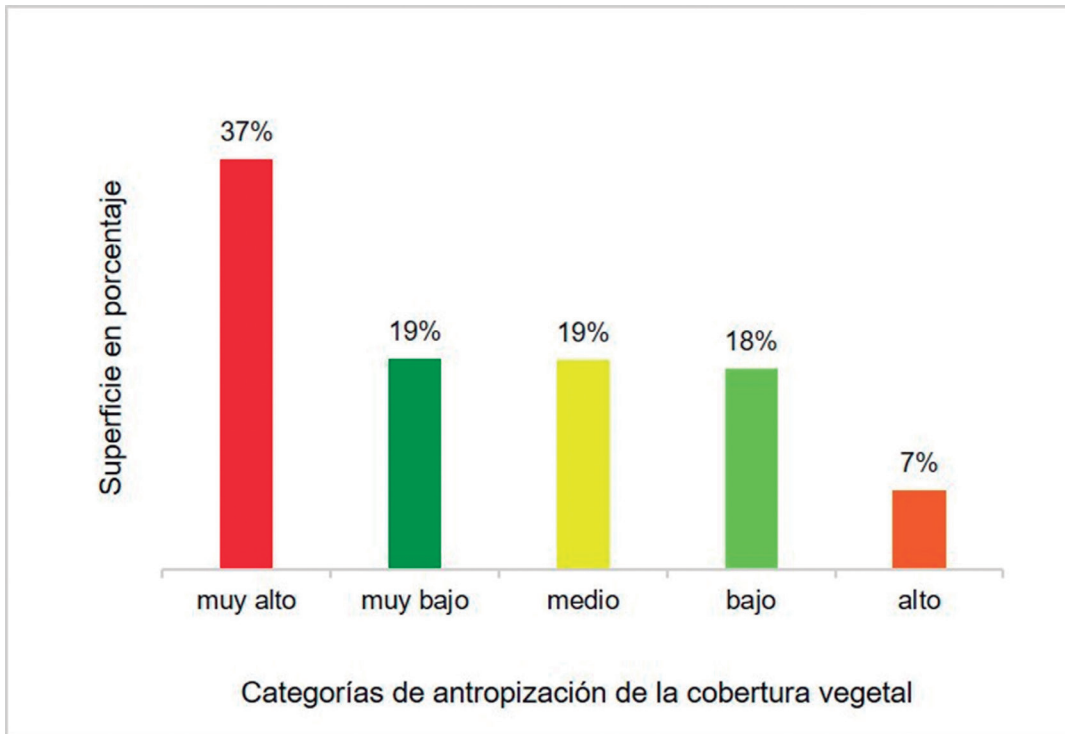
De acuerdo con los resultados, se identificaron tres zonas principales de transformación antropogénica, la primera se ubica en la parte centro, sur y este de la cuenca, donde las categorías muy alta y alta ocupan una superficie que representa 44% del total de la zona de estudio; la segunda área con un nivel medio de transformación se distribuye en las zonas noroeste, oeste, suroeste y centro, estas ocupan 19% de la extensión total de la cuenca; la tercera se dispone en la parte norte, oeste, sur oeste, sureste y extremos de las zonas centrales, donde las clases baja y muy baja abarcan 37% de la cuenca (ver figura 2).

De acuerdo con lo anterior, la evaluación del grado antropización de cada uno de los paisajes físico-geográficos que conforman la cuenca del río Armería, se analizó en tres grupos:

El primer grupo describe a las categorías con muy alto y alto grado de antropización de la cobertura vegetal que están conformada por paisajes de planicies, piedemontes, valles en clima cálido y semicálido en suelos formados en ambiente fluvio-acumulativo y fluvio-torrencial. La estructura de estos paisajes favorece la presencia de uso de suelo urbano, suburbano, agropecuario en asociación pastizales y vegetación secundaria arbustiva de selva. Esta categoría se encuentra en la parte centro, sur y sureste y representa los PFG de mayor asimilación económica de la zona de estudio (ver figura 3).

El segundo grupo representa la clase media, esta se ubica en paisajes montañosos, lomeríos, piedemontes y valles con climas templado y semicálido, en suelos formados en ambientes tectónico-kárstico, fluvio-torrencial y fluvio-acumulativo. En esta región predomina la vegetación secundaria arbustiva y arbórea de bosque y selva media subcaducifolia; los paisajes de esta categoría se localizan en el centro-norte, oeste, suroeste y en sitios del sur, y sureste (ver figura 3).

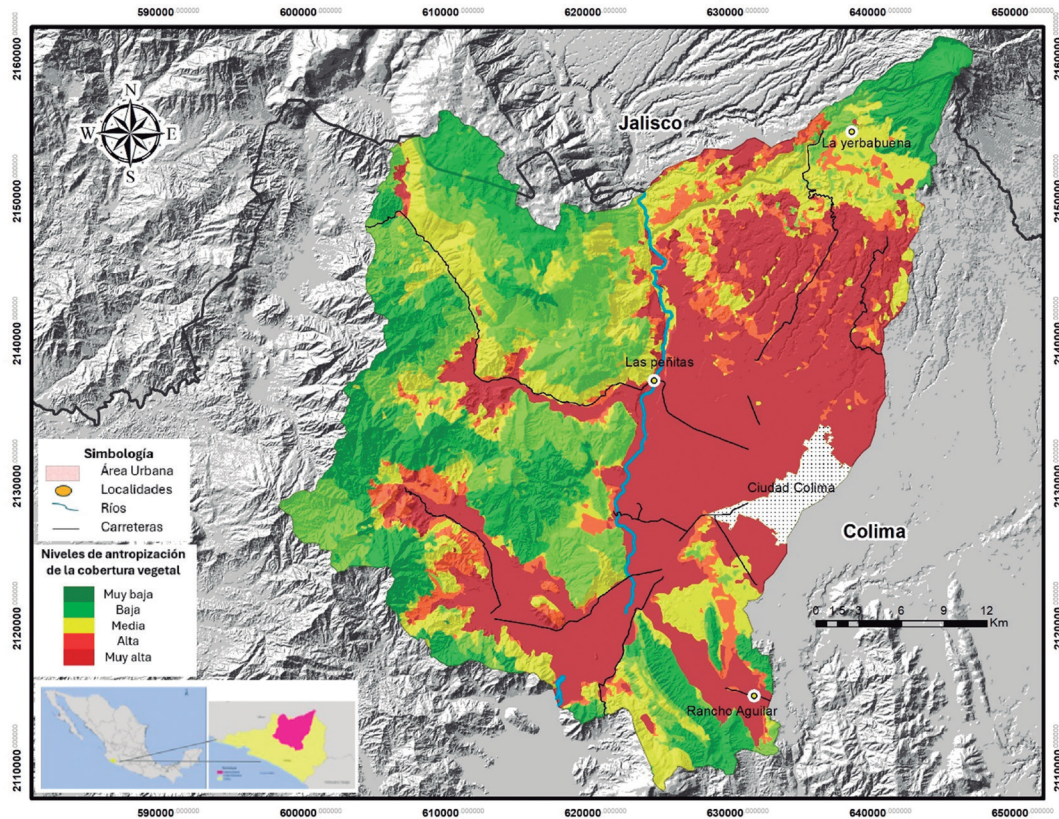
Por último, el tercer grupo de transformación de la cobertura vegetal con categorías baja y muy baja se establece en paisajes montañosos y lomeríos con climas frío, semifrío y templado, con suelos formados en ambientes volcánico-erosivo, tectónico-kárstico, fluvio-torrencial y fluvio-acumulativo. Estos paisajes manifiestan cierto equilibrio ecológico debido al bajo grado transformación que presenta la cobertura vegetal; en este sentido, la vegetación secundaria arbórea y arbustiva de bosque y selva ejerce un predominio espacial en las unidades de paisaje. Estas condiciones se distribuyen en la parte norte, noroeste, oeste de la cuenca en forma de amplios corredores; mientras que en el extremo noreste y la zona sureste se disponen a manera de parches aislados (ver figura 3 y tabla 3).



**Figura 2.** Superficie en porcentaje de las categorías del IACV. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Relación entre categorías del IACV, superficie y clave de paisajes. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	% de ocupación	Superficie km <sup>2</sup>	Localidades
Muy alto	37%	257.68 km <sup>2</sup>	XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXVIII, XXXIX, XL, XLI, XLII, XLIII, XLIV, XLV, XLVII.
Alto	7%	95.89 km <sup>2</sup>	XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XXIX, XXX, XXXI, XXXII, XXXIII, XXXIV, XXXV.
Medio	19%	255.46 km <sup>2</sup>	XVII, XVIII, XIX, XX.
Bajo	18%	245.31 km <sup>2</sup>	IX, X, XII, XIII, XIV, XV, XVI.
Muy bajo	19%	257.68 km <sup>2</sup>	I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII.



**Figura 3.** Niveles de antropización de la cobertura vegetal de los PFG de la cuenca del río Armería, Colima, México. Fuente: Elaboración propia.

## Conclusión

Los grados de antropización de la cobertura vegetal de los PFG de la cuenca del río Armería, tienen una correspondencia espacial con el acceso, es decir las categorías de alta antropización presentan mayores cambios de vegetación, lo que se relaciona con mayor asimilación económica de la región, debido a que el cambio de uso de suelo es agrícola y ganadero.

Por su parte, la categoría media representa a los paisajes en transición ambiental con tendencia a presentar una alta antropización; es decir, aquellos geosistemas que soportan una fuerte presión antrópica debido al cambio de uso de suelo -agrícola, ganadero y urbano-. Estos PFG manifiestan una discrepancia entre el uso de suelo y las condiciones morfo-edafológicas.

Por otra parte, las categorías bajas de antropización de la cobertura vegetal favorecen a la conservación de la geo y biodiversidad de la cuenca, además, permiten la disponibilidad de servicios ambientales a la población local.

Los resultados obtenidos en los PFG de origen volcánico son similares a los expuestos por Cruz-Peralta y Ramírez-Sánchez (2023); en ambos estudios las categorías baja y muy baja se distribuyen en los complejos cumbrales y en las laderas de mayor pendiente; en cambio, los nive-

les más elevados se ubican en el piedemonte y planicie, debido a que existe una similitud en los paisajes volcánicos del Nevado de Toluca, y la región de la cuenca del río Armería.

En conclusión, la evaluación del grado de conservación de la cuenca del río Armería con el Índice de antropización de la cobertura vegetal determina que la vegetación permite identificar de manera objetiva los procesos de degradación geocológica en el territorio, favoreciendo la generación y aplicación de herramientas para la planificación ambiental.

Por último, los tipos de PFG de montaña son favorecidos por una menor accesibilidad, lo que propicia la conservación de biodiversidad, lo cual es favorable para mantener el equilibrio de los servicios ecosistémicos en tanto que los PFG de planicie, valle y piedemonte representan los territorios de mayor asimilación económica de la cuenca, y que genera un mayor grado de antropización de la cobertura vegetal de la cuenca.

## Agradecimientos

El primer autor agradece al Doctor Horacio Morales Iglesias del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la UNICACH por el acompañamiento académico y profesional para realizar la presente investigación. De igual manera se agradece el apoyo académico del Doctor Luis Miguel Espinosa Rodríguez de la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México. También agradece las observaciones y sugerencias de los dictaminadores de este capítulo.

## Referencias

- Assessment, M. E. (2003). Millennium ecosystem assessment. *Ecosystems*.
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, Á. y Burgos, A. (2010). La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial: Una revisión de la bibliografía. *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. México.
- Bollo Manent, M., Hernández Santana, J. R., & Méndez Linares, A. P. (2014). The state of the environment in Mexico. *Central European Journal of Geosciences*, 6, 219-228.
- Bollo-Manent, M. y Martínez-Serrano, A. (2023). Fundamentos de geoecología del paisaje en A. Martínez-Serrano y M. Bollo-Manent (Eds.), *El paisaje. Una mirada a través del análisis espacial* (pp. 13-35). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-UNAM.
- Cruz-Peralta, M. A. & Ramírez-Sánchez, L. G. (2023). Antropización del Paisaje de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. *Punto Cunorte*, 16, 13-42.
- De la Lanza-Espino (2019). Prólogo en Ornelas-García (Ed.), *Antropización: primer análisis integral*, (1ª edición, 414p). Dirección General de Bibliotecas UNAM.
- Jiménez-Velázquez, M. (2024). *Análisis geoecológico de la cuenca del río Armería, Colima México*. Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Manent, M. B., & Fernández, I. V. (2020). *Sostenibilidad espacial y ambiental de la provincia Ciudad de La Habana. Informe de los resultados del proyecto CAESAR*. Editorial Universitaria (Cuba).

- Mateo, J. M. y Ortiz, M. A. (2001). *La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica*. Serie varia - Instituto de Geografía. UNAM. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Mateo, J. (2002). Geografía de los paisajes. Primera parte. *Paisajes Naturales* (188 p). Ciudad de La Habana: Editorial Universitaria.
- Métodos de clasificación de datos—ArcGIS Pro | Documentación. (s. f.). <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- Morales-Iglesias, H., Priego-Santander, A., Bollo-Manent, M. y Ríos, J.M. (2019). La antropización de la cobertura vegetal en los paisajes del estado de Chiapas, México. *Papeles de Geografía*, 65, 139-154.
- Priego, Á., Cotler, H., Fregoso, A., Luna, N., Enríquez, C. (2004). La dinámica ambiental de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta Ecológica*, 71, 23-38.
- Quesada, M., Sanchez-Azofeifa, G. A., Alvarez-Anorve, M., Stoner, K. E., Avila-Cabadilla, L., Calvo-Alvarado, J., & Sanchez-Montoya, G. (2009). Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives. *Forest ecology and management*, 258(6), 1014-1024.
- Ramírez-Sánchez, L. G., Priego, A. G., & Bollo, M. (2022). Modificación antropogenética de la cubierta vegetal de los paisajes naturales de Michoacán en C. Arredondo (Ed.), *Paisaje y territorio en el occidente michoacano* (pp. 215–244). Coordinación de Humanidades.
- Ríos, L. (2018). *Evaluación de la antropización de la cobertura vegetal de los paisajes de Cerro Grande, Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima, México*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J.L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E.N., Salinas-Chávez, E., Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21-35.
- Sánchez, M. T., Bocco, G. and Casado, J.M. (2013). Reflexiones sobre sus avances y retos a futuro en M. T. Sánchez-Salazar, G. Bocco-Verdinelli y J. M. Casado-Izquierdo (Eds.), *La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica* (pp. 19–44). Instituto de Geografía, UNAM-SEMARNAT.
- Shishenko, P. G. (1988). Estabilidad de los paisajes a las cargas económicas. *Geografía Física Aplicada*. Editorial de la Escuela Superior, Kiev, Ucrania, 195.

# Análisis de riesgos de fenómenos naturales en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez

Rosa Isabel Hernández-Sánchez<sup>1</sup>, Salvador Isidro Belmonte-Jiménez<sup>2</sup>,  
Angel Figueroa-Soto<sup>3</sup> y Francisco Castellanos-León<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CONAHCyT - Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR Unidad Oaxaca

<sup>3</sup>CONAHCyT - Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH

\*sjimenez@ipn.mx

## Resumen

El estado de Oaxaca se encuentra conformado por 570 municipios (INEGI, 2020). En particular, la zona metropolitana de la Ciudad de Oaxaca está integrada por 23 municipios en donde habitan cerca de 543,721 personas que pertenecen a los distritos del centro: Zimatlán, Zaachila, Etlá y Tlacolula (Gobierno del estado de Oaxaca, 2024). Particularmente, en la zona del semi graben del Valle de Etlá se encuentra la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez que es atravesado por el río Atoyac y es el que abastece a los pozos de la zona metropolitana de la Ciudad de Oaxaca.

El reconocimiento de la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez es de vital importancia para sugerir mejoras en el manejo hidrológico del acuífero Valles Centrales de Oaxaca, como, por ejemplo: la búsqueda y delimitación de zonas idóneas de recarga, para proponer intervenciones que contribuyan a mejorar la disponibilidad del recurso hídrico.

El principal objetivo de este trabajo consistió en realizar una revisión bibliográfica de los principales riesgos a fenómenos naturales como son la vulnerabilidad a la sequía, inundaciones, fallas, susceptibilidad de laderas y sismos que afectan a la región de la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez, ya que es una zona de importancia por su ubicación geográfica en el centro del estado de Oaxaca y por ser la principal zona que contribuye a los pozos que abastecen de agua a la zona metropolitana de la Ciudad de Oaxaca.

**Palabras clave:** Acuífero Valles Centrales de Oaxaca; río Atoyac-Oaxaca de Juárez, Hidrogeofísica, Riesgos.

## Introducción

La Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO) es principalmente vulnerable a fenómenos de origen hidrometeorológico y geológico, siendo los principales los asociados a sequías, inundaciones y sismos, ya que su manifestación puede ser detonante de otros fenómenos como los deslaves, deslizamientos de laderas y la caída y/o daño de estructuras dentro y fuera de la Ciudad (Márquez-López,

2022]). Según el atlas de riesgo para el municipio de Oaxaca de Juárez, los principales peligros se localizan al noroeste y suroeste de la ciudad, ya que en estas zonas se localizan la mayor cantidad de asentamientos irregulares y relieves más pronunciados como lomeríos y montañas, sin contar con los efectos de sitio durante la ocurrencia de sismos que se presentan por el tipo de suelo.

Por otro lado, al sur de la ciudad, la alteración de escurrimientos naturales por obras y vialidades, el desbordamiento de los ríos Atoyac y Salado, suelen ocasionar grandes inundaciones, como la ocurrida en la zona del andador de San José la Noria (2021), colonias y fraccionamientos en Santa Cruz Xoxocotlán (2011, 2014, 2017, 2021) y Villa de Zaachila (2011), reportada por los principales periódicos de Oaxaca (Márquez-López, 2022).

La subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez está limitada al este y al oeste por las fallas "Siempre Viva" y "Oaxaca" respectivamente (Alaníz-Alvarez y Nieto-Samaniego, 1997; Campos-Enríquez *et al.*, 2010). Esta subcuenca se ubica al noroeste de la ciudad de Oaxaca a 17°10'N de latitud, 96°20'W de longitud, con una superficie aproximada de 400 km<sup>2</sup> y una altitud promedio de 1660 m sobre el nivel del mar. Este valle es de origen aluvial, compuesto por materiales granulares cenozoicos del complejo milonítico (Sierra Juárez) y granitos cubiertos por secuencias sedimentarias Paleozoicas y Mesozoicas (complejo Oaxaca), que constituyen el basamento de la región. En la zona norte del valle se encuentran sedimentos de diferentes tamaños como arcillas, arenas, gravas y cantos rodados en forma de mezcla heterogénea (Belmonte-Jiménez *et al.*, 2003). El relieve del basamento geohidrológico es irregular, poco profundo y compuesto por arcillas que afloran en algunos lugares del interior del valle (Hernández-Sánchez *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista geohidrológico, en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez los niveles piezométricos varían de 1560 a 1670 m y la profundidad del nivel freático varía de 2 a 15 m (Belmonte-Jiménez *et al.*, 2003). Además, la sección litológica de 41 km de longitud modelada por Hernández-Sánchez (2016) a partir de datos gravimétricos y magnéticos determinó que las rocas predominantes son metamórficas (metagranitos) pertenecientes al complejo Oaxaqueño, Complejo milonítico Aloapan, el sedimentario Formación Jaltepetongo y Formación volcánica Suchilquitongo. El espesor de la secuencia sedimentaria varía entre 500 y 800 m; el espesor del aluvión varía entre 5 y 100 m; y existen afloramientos de rocas metamórficas en la zona noroeste (Hernández-Sánchez, 2016).

## Objetivo General

Identificar los principales fenómenos naturales que definen el peligro en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez, así como determinar el nivel de importancia de estos fenómenos con respecto al riesgo que representan para la subcuenca.

## Ubicación del área de estudio

Los Valles Centrales del estado de Oaxaca comprenden una extensión territorial de 11,987.58 km<sup>2</sup>, que representa aproximadamente el 17% de la superficie estatal y es una región constituida por tres valles intermontanos: el valle de Etla, el de Tlacolula y el de Zimatlán- Zaachila-Ocotlán.



Esta área comprende siete distritos: Ocotlán, Zimatlán, Zaachila, Etna, Ejutla, Tlacolula y Centro, la cual se subdivide en 121 Municipios, algunos de ellos presentando las mayores densidades poblacionales del estado, como lo son: Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán, Santa Lucía del Camino y, Santa María Atzompa.

Dentro de la región se encuentra la subcuenca Río Atoyac-Oaxaca de Juárez con una superficie de 5,863 km<sup>2</sup> (figura 1). La subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez pertenece a la Región Hidrológica Costa Chica - Río Verde, la cual limita con las siguientes Regiones Hidrológicas: al norte con Papaloapan, al sur con Costa de Oaxaca (Puerto Ángel) y al este con Tehuantepec, de acuerdo con el INEGI (2020).

La subcuenca pertenece a la Región Hidrológica Administrativa Pacífico Sur y colinda al norte con la Región Hidrológica Administrativa Golfo centro. Esta subcuenca comprende los distritos de Etna, Ixtlán, Centro, Tlacolula, Ocotlán, Ejutla y parte de Miahuatlán y Sola de Vega. En el año 2020, se estiman 1,362 localidades con una población de 1,181,133 habitantes y densidad poblacional de 201 hab/km<sup>2</sup> (IMTA, 2023).

## Marco Tectónico y Geológico

Desde el punto de vista tectónico, el estado de Oaxaca es una de las zonas sísmicas más importantes de México, debido a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana y a la actividad sísmica relacionada con la estructura intraplaca que provoca sismos poco profundos, por lo que Oaxaca ha sido afectada por un gran número de eventos sísmicos con magnitudes superiores a 7 (Garduño-Monroy *et al.*, 2019).

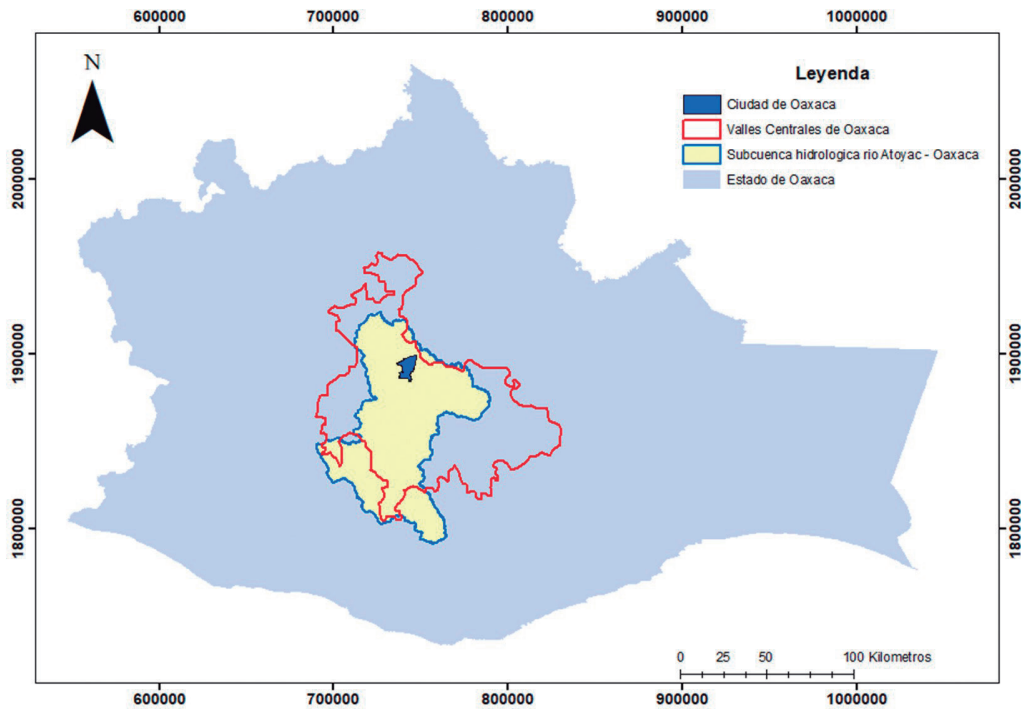
Además de los terremotos asociados al proceso de subducción, en el estado de Oaxaca se presentan fallas intraplaca relacionadas con los límites de los terrenos tectonoestratigráficos expresados en los valles Centrales de Oaxaca y que son parte del sistema de la falla de Oaxaca.

Históricamente y con enfoque tectónico, se han realizado estudios que han contribuido a entender el comportamiento de la falla de Oaxaca. Se presentan de manera general algunos, pudiéndose mencionar, entre otros, a Barrera (1931) y a Centeno-García (1988), siendo éste el primer autor que reconoció la falla de Oaxaca como uno de los lineamientos tectónicos superpuestos de la porción meridional de México; dividiéndola en dos sectores, el primero entre Tehuacán y Cuicatlán y el segundo entre Etna y Ejutla.

Álvarez y Del Río (1975) identificaron, a partir de un análisis de imágenes de satélite, un alineamiento que corresponde parcialmente a la falla de Oaxaca. Este lineamiento va del Golfo de México a la costa del Pacífico, con una longitud de 475 km y lo considera como un fallamiento transcontinental.

Demant (1978) le asignó el nombre de falla Pico de Orizaba-Tehuacán-Oaxaca a esta estructura y la prolonga hacia el norte hasta el volcán Cofre de Perote; la consideró como el límite oriental del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Según Ortega-Gutiérrez (1982), la expresión de la falla de Oaxaca se debe a un rejuvenecimiento, probablemente activo desde el Terciario, que corresponde a un desplazamiento oblicuo, con componente lateral y vertical de la misma longitud relativa, sin indicar el sentido.



**Figura 1.** Delimitación del área de estudio, se muestra la ubicación de la región de los Valles Centrales de Oaxaca (contorno rojo) y la delimitación de la subcuenca río Atoyac - Oaxaca de Juárez. Ambos se ubican dentro del estado de Oaxaca al sur de la República Mexicana.

Centeno-García (1988) menciona que la falla de Oaxaca está relacionada con el levantamiento de las sierras de Juárez y mazateca, desarrollándose en una zona de debilidad cortical, localizada entre los bloques y esféricos con composiciones de espesores diferentes, que controlan la geometría y localización de la falla. La misma autora manifiesta que la edad máxima del último fallamiento es post-mioceno-medio.

El frente occidental de la Sierra de Juárez está caracterizado por un complejo estructural de más de 130 km de longitud por 15 km de ancho, con alineación N-S que constituye el cinturón milonítico más grande de México localizado en el frente occidental de la Sierra de Juárez (Alarín-Álvarez y Nieto-Samaniego, 1983; Barbosa-Gudiño *et al.*, 1994).

De acuerdo con Nieto-Samaniego *et al.* (1995), la falla de Oaxaca se manifiesta como un escarpe rectilíneo de dirección N10°W, que consiste en un grupo de fallas paralelas o que forman ángulos de hasta 25° con esa dirección. Considera que en el bloque del bajo están las rocas del complejo milonítico Sierra de Juárez, cuya edad está entre el Paleozoico tardío y el Jurásico Medio, y en el bloque del alto, rocas pertenecientes al Complejo Oaxaqueño de edad precámbrica y su cobertura Cretácico, o bien rocas volcánicas y sedimentarias continentales terciarias.

Aunque no se conocen con precisión las causas que generan las zonas de sutura o "frentes tectónicos", Molnar y Tapponier (1975) indican que el choque entre placas continentales produce esfuerzos que se transmiten a largas distancias dentro de la litosfera continental. Cuando dos macro continentes chocan de frente, se producirían estructuras geológicas como fracturas de tensión, diques máficos, con rumbo perpendicular a la dirección de choque (frente de sutura). Para el caso de nuestra área de estudio, en los Valles centrales de Oaxaca, se expone una estructura que separa los gneises Precámbricos del terreno Zapoteco con rocas metamórficas y sedimentarias del terreno Cuicateco (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1990), mostrándose actualmente como un lineamiento general NW10°SE llamado falla de Oaxaca que se desarrolló durante el Cenozoico; donde el significado tectónico de esta frontera, por una parte constituye el complejo milonítico más grande de México, quizá uno de los mayores de la cordillera de Norteamérica, y por otro lado se límite entre dos terrenos tectonoestratigráficos.

Belmonte (2005) obtuvo modelos que explican por una parte la prolongación de la estructura regional de la falla de Oaxaca hacia el sur de la ciudad de Oaxaca, hasta Ocotlán de Morelos y probablemente continúe hasta Miahuatlán de Porfirio Díaz. También, se interpretó una falla al poniente a partir de los datos de gravimetría y magnetometría denominada falla de Huitzo al noroeste y falla de Zimatlán al sur, formándose una estructura tipo fosa tectónica en el valle de ETLA y de Zaachila que fue rellenada por rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico, siendo cubiertas finalmente por materiales granulares del Cuaternario. Este último depósito es el que constituye el acuífero libre, denominado Acuífero Valles Centrales de Oaxaca (AVCO), que actualmente está en explotación y cuyas características hidrogeológicas lo hacen vulnerable a la contaminación por fuentes superficiales tal como los ríos Atoyac y Salado, considerados como una fuente receptora de las aguas residuales de la zona.

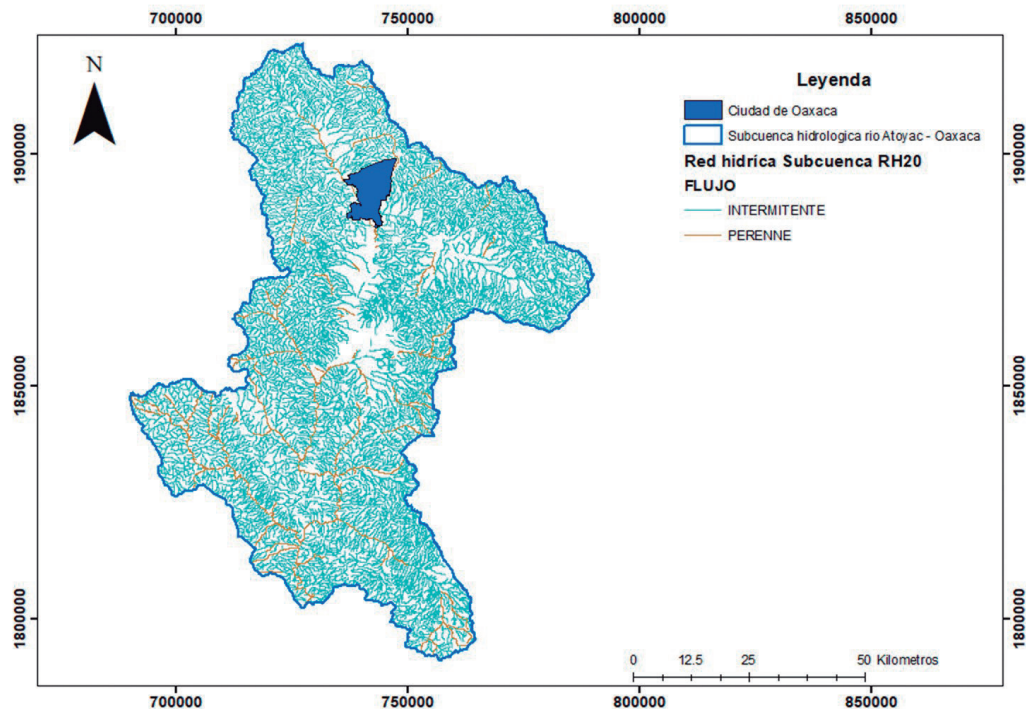
## Resultados y Discusiones

### ***Red hidrológica de la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez***

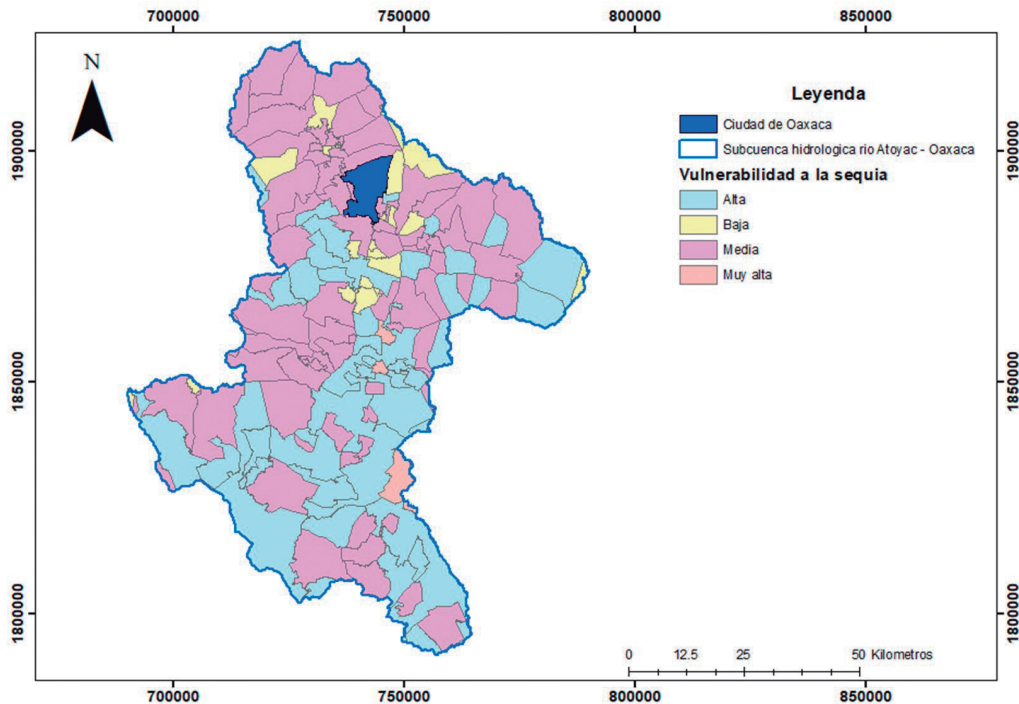
La red hidrográfica en el área de estudio es compleja, con afluentes intermitentes y perennes alimentados por tributarios de diferente orden. El orden de los afluentes de los cauces presentes en una cuenca se clasifica de acuerdo con la unión de los tributarios que originan a cada uno de éstos, reflejando el grado de ramificación del sistema de drenaje de la cuenca. De acuerdo con las características geológicas del área, las rocas que predominan son de baja permeabilidad, por esta razón, y considerando las pronunciadas pendientes que constituyen las laderas de la sierra, estas microcuencas tienden a ser de respuesta rápida, lo que implica que, ante una lluvia repentina de alta intensidad en las zonas altas, la mayoría del agua escurre superficialmente y de manera torrencial en un tiempo muy corto (SEMAEDES, 2021). En la figura 2 se puede observar que los únicos flujos perennes son los ríos Atoyac y El Salado, los cuales actúan como drenes en ciertas porciones del acuífero. Dada la presencia de zonas con niveles freáticos someros, también tiene lugar el proceso de evaporación y por supuesto el de infiltración para la recarga del acuífero.

### Vulnerabilidad a la sequía

El peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños; la vulnerabilidad ante la sequía es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural; y el riesgo por sequía está determinado por la confluencia del peligro y la vulnerabilidad (Ortega *et al.*, 2018). Basado en estos conceptos y la intensificación de la variabilidad climática natural, con un aumento en la frecuencia y severidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (como las sequías y las inundaciones) se infiere que para la subcuenca río Atoyac- Oaxaca de Juárez se tiene una vulnerabilidad Media y Alta en la mayor parte del área de la subcuenca (figura 3), la cual se asocia principalmente a la disminución severa y prolongada de lluvia, la cual es capaz de provocar grandes desequilibrios hidrológicos y afectar las actividades socioambientales. Por lo tanto, el peligro de que ocurra una sequía dentro del área de estudio depende del grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural. Esta vulnerabilidad está vinculada a los impactos potenciales ocasionados por los episodios de sequía.



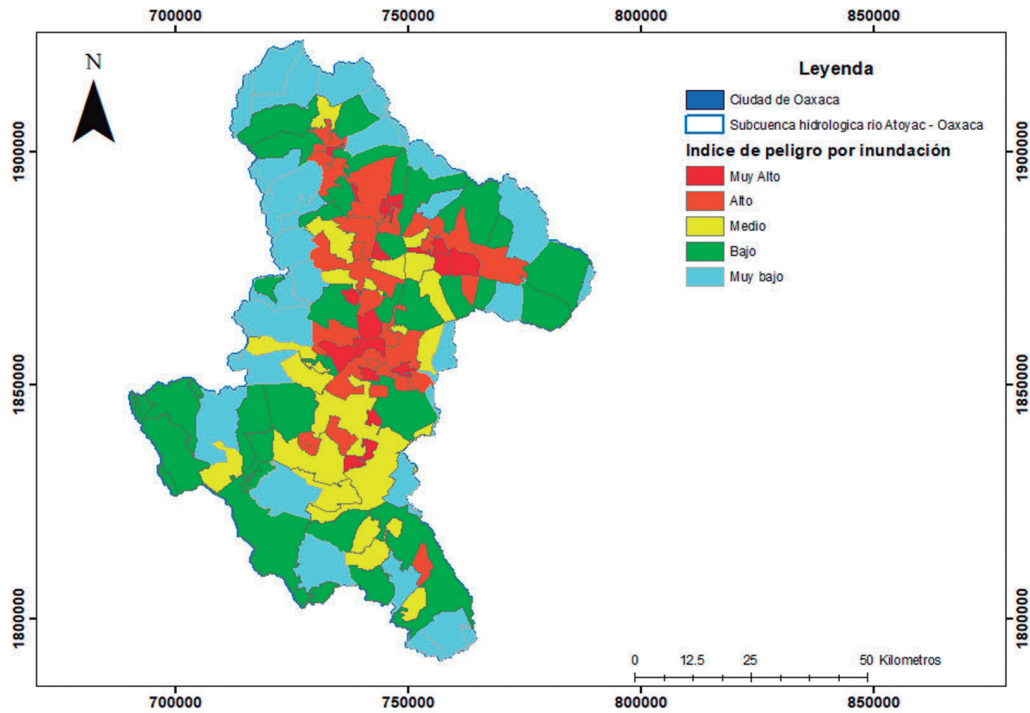
**Figura 2.** Red hidrológica de la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez, se observa que las corrientes de flujo perenne son principalmente los ríos Atoyac y El Salado.



**Figura 3.** Mapa donde se observa los sitios vulnerables a la sequía y los riesgos: Muy altos, altos y bajos en la subcuenca río Atoyac- Oaxaca de Juárez. Fuente: elaboración propia modificado de <http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>

## Índice de peligro por inundación

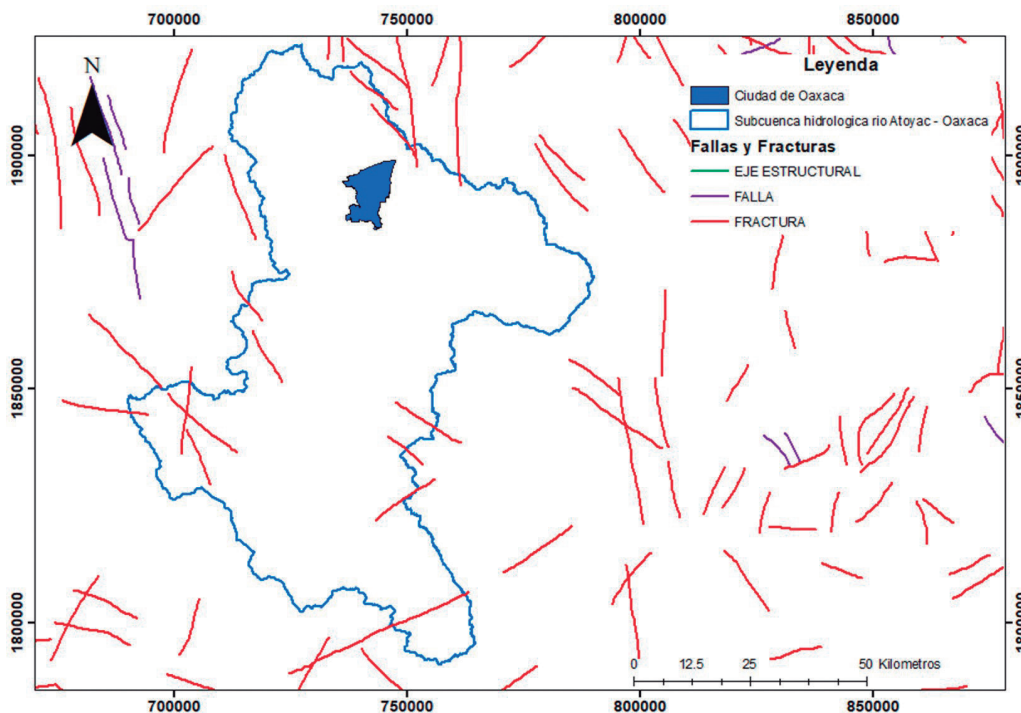
El índice de peligro por inundación (IPI) clasifica el peligro por inundación en cinco niveles distintos: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. El IPI fue construido con factores topográficos, climatológicos, uso de suelo y tipo de suelo. Fue elaborado por la Subdirección de Riesgos por Inundación en 2016 y como principal insumo utilizó el índice de inundabilidad de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Debido a que el IPI fue elaborado en 2016, algunos municipios de reciente creación carecen de una asignación de nivel de peligro. Dicha capa está disponible en el Atlas Nacional de Riesgos (ANR) en el Sistema Nacional de Información sobre riesgos. En la figura 4 se observa que los riesgos: Muy alto, alto y medio se encuentran principalmente en Ocotlán, Etlá, Tlacolula y Ejutla de Crespo. Las inundaciones son una de las causas más importantes de pérdida de vidas humanas y de recursos materiales en el mundo y constituyen uno de los desastres a los que se dedica la mayor cantidad de recursos, incluso por encima de sismos o epidemias. Los factores que contribuyen a las avenidas por inundaciones pueden clasificarse como meteorológicos, hidrológicos y humanos. Por lo tanto, el riesgo a inundaciones no puede explicarse sin la evaluación de la vulnerabilidad, la severidad y el grado de exposición.



**Figura 4.** Mapa donde se observa el índice de peligro por inundación en la subcuenca río Atoyac- Oaxaca de Juárez, se observan los riesgos: Muy altos, altos y bajos dentro de la subcuenca. Fuente: elaboración propia modificado de <http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>

### **Fallas y Fracturas**

Las fallas y fracturas son producto de la deformación frágil en cualquier tipo de roca, las cuales se forman por esfuerzos cortantes en zonas de compresión o tensión. La figura 5 muestra una serie de fracturas con orientaciones paralelas a la traza principal del sistema de fallas. El principal peligro que pudiera estar asociado a estos sistemas de fallas y fracturas es la ocurrencia de deslizamientos de laderas inducidos por la infiltración de agua de lluvia a lo largo de estas superficies de debilidad (Atlas de Riesgo del Municipio de Oaxaca, 2011). Por consiguiente, su distribución es un dato determinante para la identificación de peligros por procesos de remoción en masa. En los límites de la subcuenca existen aproximadamente doce fracturas rodeando la subcuenca, como se mencionó, la presencia de estas fracturas puede ser asociada a peligros como el deslizamiento de laderas (Jerónimo-García, 2016).



**Figura 5.** Fallas y Fracturas dentro del territorio Oaxaqueño, se observan los límites (línea azul) de la subcuenca río Atoyac- Oaxaca de Juárez Fuente: elaboración propia modificado de <http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>

### Sismicidad

En la figura 6 se observan los mecanismos focales de los sismos de magnitud superior a 7 (IRIS, 2018) en todo el estado de Oaxaca. La mayoría de estos mecanismos focales están asociados a la zona de fuerte acoplamiento entre las placas tectónicas de Cocos y Norteamérica (interplacas, fallamiento inverso) y otros a procesos de ruptura de la placa de Cocos subducida (fallamiento normal).

Cabe mencionar que en los años 2017 y 2018 ocurrieron eventos sísmicos de importancia en Oaxaca, el primero el 7 de septiembre de 2017 con magnitud 8.2 Mw y epicentro ubicado en el Golfo de Tehuantepec, a 137 km al sureste de Pijijiapan (Chiapas) y a 46 km de profundidad (Melgar *et al.*, 2018); este evento intraplaca se relaciona principalmente con un fallamiento normal (buzamiento de 79°) que provocó la ruptura completa de la litosfera en una zona relacionada con la brecha sísmica de Tehuantepec, en la que no se había presentado ningún evento de esta magnitud desde el sismo de magnitud 8.6 Mw ocurrido el 28 de marzo de 1787 (Suarez y Albini, 2009; Melgar *et al.*, 2018).

El segundo evento correspondió a un sismo interplaca y ocurrió el viernes 16 de febrero de 2018, de magnitud 7.2 Mw y con epicentro a 11 km de Pinotepa Nacional, Oaxaca (Li *et al.*, 2020). Ambos eventos provocaron pérdidas materiales y humanas (Garduño-Monroy *et al.*, 2019).

El 23 de junio de 2020 ocurrió un sismo interplaca de magnitud 7.4 Mw que generó una amplia percepción en casi todo el estado de Oaxaca, así como un tsunami de larga duración (Wen *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2022). Es importante mencionar también que Singh *et al.* (2023) analizaron particularmente la repetición de sismos en la zona costera de Oaxaca a partir del análisis de los sismogramas, lo que estaría relacionado con la dinámica de ruptura de los eventos.

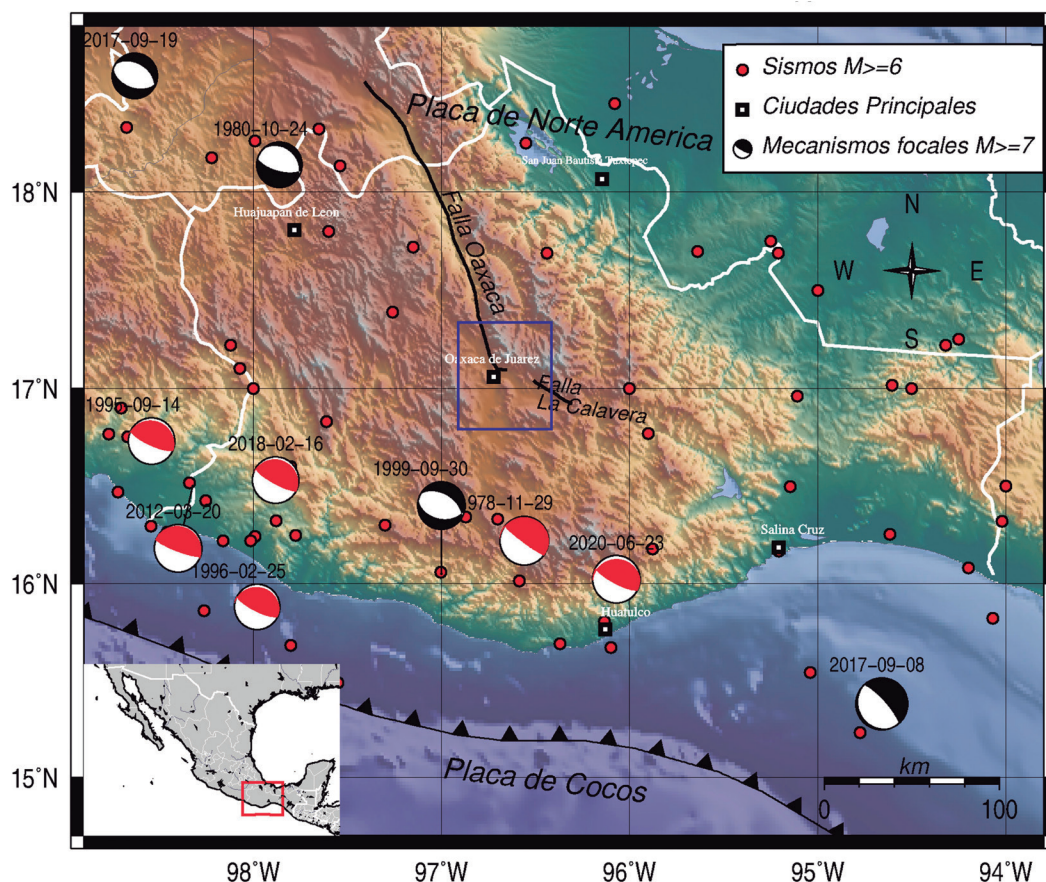
Particularmente la zona de la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez corresponde a la zona sismogénica asociada con sismos intraplaca (dentro de la placa norteamericana). En esta zona, denominada como NAM según Zúñiga *et al.* (2017), los sismos tienen profundidades no mayores a 20 km y sus magnitudes oscilan en el rango de  $M < 6$  (figura 7).

Respecto a los periodos de recurrencia para la zona central del estado de Oaxaca, particularmente en donde se encuentra la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez, Zúñiga *et al.* (2017) reportan periodos de recurrencia de 6 años para terremotos con magnitudes superiores a 5.0 Ms que ocurren en esta zona, mientras que Talavera-Cervantes y Mendoza-Ponce (2024) reportan periodos de recurrencia de 70 años para sismos de magnitudes mayores o iguales a 6.5 Mw.

Es de interés particular la sismicidad asociada a fallas activas en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. Como se ha observado recientemente existe evidencia de sismos locales y someros que han provocado deslizamientos de terreno, como sucedió particularmente en la ciudad ancestral de Mitla (Garduño-Monroy *et al.*, 2019; INAH, 2024), en donde a partir de evidencias morfológicas y geofísicas Garduño-Monroy *et al.* (2020) determinaron que la falla La Calavera (con una longitud de 13 km) pudo haber desencadenado un terremoto de magnitud 7 Mw en 1507 según el Códice Telleriano-Remensis. Este fenómeno podría ocurrir en cualquier falla activa dentro de la subcuenca.

Por otro lado, para sismos dentro de la placa de cocos subducida (eventos intraplaca con profundidades de 40 a 180 km), Zúñiga *et al.* (2017) reporta periodos de 109 años para magnitudes superiores a 7 Ms, mientras que Talavera-Cervantes y Mendoza-Ponce (2024) reportan periodos de recurrencia de 72 años para sismos de magnitudes mayores o iguales a 6.5 Mw.



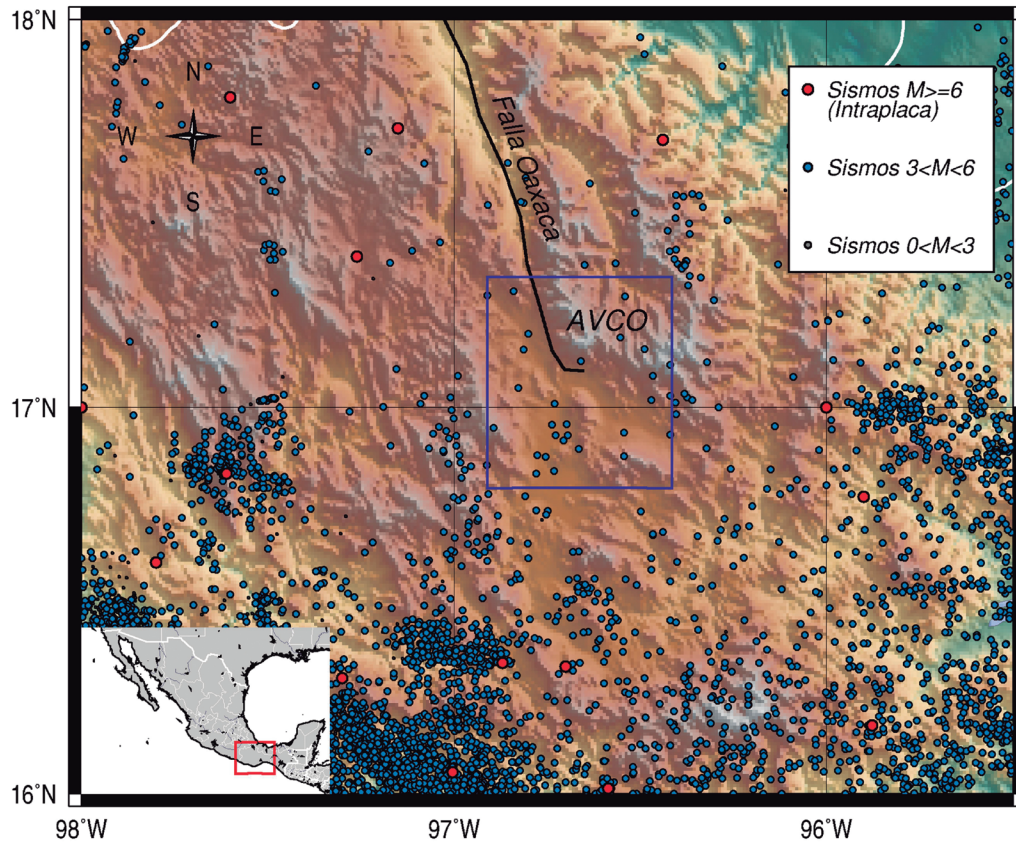


**Figura 6.** Sismicidad de magnitud mayor o igual a 6 tomados del catálogo del SSN (2023) para el periodo de 1910 a 2023 y mecanismos focales para sismos de magnitud mayor a 7 Mw tomados del proyecto Global CMT (Ekström *et al.*, 2012). Los mecanismos focales asociados a fallamiento normal se presentan en color negro y los asociados a fallamiento inverso en color rojo. El recuadro azul indica la Zona Metropolitana de Oaxaca. (Mapa modificado de Márquez-López *et al.*, 2024).

### **Susceptibilidad de deslizamiento de laderas**

Los fenómenos naturales que con mayor frecuencia ocurren dentro del área estudiada, son aquellos relacionados con las precipitaciones pluviales extremas, por lo regular asociadas con la entrada al continente de huracanes y tormentas tropicales entre los meses de junio y noviembre, los cuales, además de caudalosas avenidas de agua por cauces y arroyos, provocan el deslizamiento de suelos y rocas sobre las laderas de los cerros. La figura 8 muestra los principales sitios susceptibles a deslizamiento de laderas. Dentro de la subcuenca se encuentran 4 sitios, al norte en el municipio de San Francisco Telixtlahuaca, los otros tres se encuentran ubicados

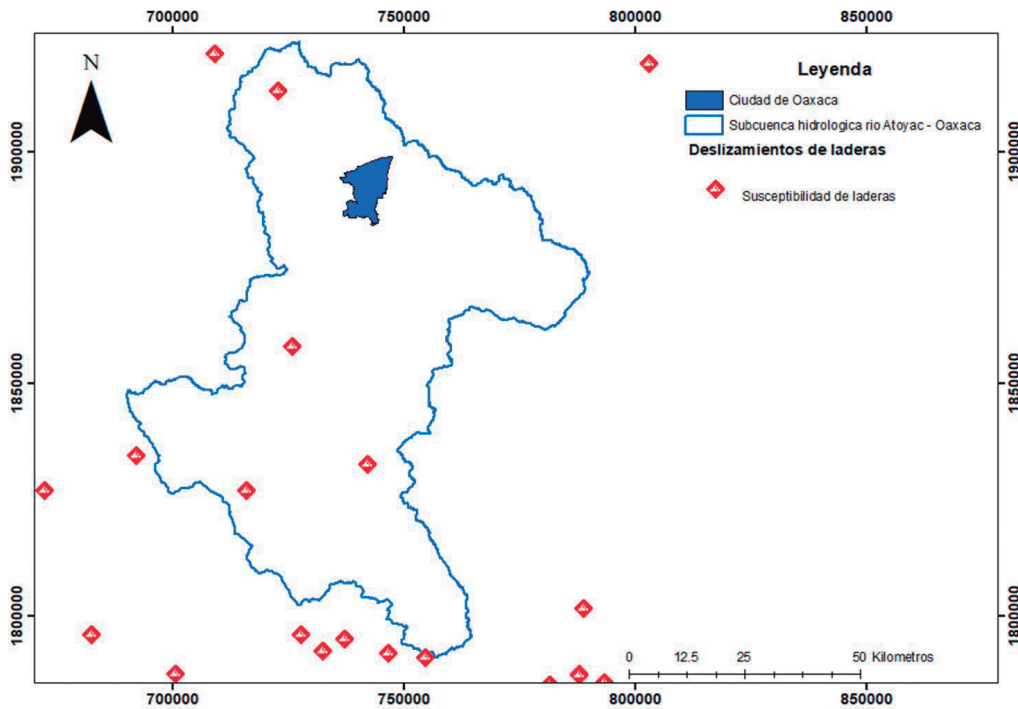
al suroeste de la subcuenca, en los municipios de Zimatlán, Ejutla de Crespo y Sola de Vega. Estos fenómenos se asocian principalmente a la presencia de estructuras geológicas, así como la infiltración del agua de lluvia.



**Figura 7.** Sismicidad cortical en la zona central del estado de Oaxaca. Los sismos tomados del catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2024) considerando la región sismotectónica NAM (Zúñiga *et al.*, 2017) para el periodo 1979 a 2024. El recuadro azul indica la zona del Acuífero Valles Centrales de Oaxaca.

## Conclusiones

Se realizó una revisión de los riesgos de fenómenos naturales en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez con el objetivo de destacar los diversos peligros naturales que afectan a la región de la subcuenca del río Atoyac-Oaxaca de Juárez. Dentro de los principales peligros identificados en la subcuenca se encuentran las inundaciones y sismos, eventos que históricamente se han presentado en la región causando importantes afectaciones.



**Figura 8.** Ubicación de los puntos más susceptibles al deslizamiento de laderas. Fuente: elaboración propia modificado de <http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>

Particularmente la actividad sísmica puede estar asociada con los fenómenos de deslizamientos de laderas como ha ocurrido en el pasado en la zona de Valles Centrales de Oaxaca, adicionalmente a las altas amplificaciones sísmicas del terreno durante la ocurrencia de sismos regionales y locales.

Los fenómenos de deslizamientos de laderas, inundaciones y sequía tienen una relación estrecha, por lo que requieren de un estudio particular para evaluar la influencia de los mismos en áreas particulares de la subcuenca del río Atoyac-Oaxaca de Juárez.

La mayoría de los fenómenos estudiados tienen como constante la falta o ausencia de información, por lo que es deseable el establecimiento de instrumentación permanente asociada a cada uno de ellos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Instituto Politécnico Nacional - CIIDIR Unidad Oaxaca por el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo. El catálogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (México) es posible gracias a todo su personal y producto de los cálculos realizados por su área de Análisis e Interpretación de Datos Sísmicos.

## Referencias

- Alaníz-Alvarez, S. A., y Nieto-Samaniego, A. F. (1997). Representación gráfica de los dominios de ruptura y deslizamiento, aplicación a la falla de Oaxaca, México. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 14(1), 26–37.
- Atlas de Riesgos del municipio de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. (2011). <http://sisplade.oaxaca.gob.mx> > sisplade > Tomo3
- Barboza-Gudiño, J.R. (1994). *Regional geologische Erkundungen entlang del GEOLIMEX–Traverse in Südmexiko, unter besonderer Berücksichtigung der Sierra de Juárez, Oaxaca*: Clausthal–Zellerfeld, T.U. Clausthal, Tesis doctoral, 139 pp.
- Barrera, D. T. (1931). *El temblor del 14 de enero de 1931*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 40pp.
- Belmonte-Jiménez, S. I., Campos-Enríquez, J. O., y Herrera-Barrientos, J. (2003). Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etla, Oaxaca, México. *Revista Geofísica*, 59, 19.
- Campos-Enriquez, J. O., Belmonte, S. I., Keppie, J. D., Ortega, F., Arzate, J. A., Martínez, J., y Martínez-Serrano, R. G. (2010). Gravity and magnetic survey of the Oaxaca city region: Cenozoic horst-and-graben structure superimposed on the Oaxaca-Juarez terrane boundary, southern Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(3), 572–585.
- Centeno-García, E. (1988). *Evolución estructural de la falla de Oaxaca durante el Cenozoico*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias (Doctoral dissertation, tesis de maestría), 156 pp.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) [http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM\\_ENT=Oaxaca&CVE\\_ENT=20](http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT=Oaxaca&CVE_ENT=20)
- Ekström, G., Nettles, M., and Dziewonski, A.M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid- moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Garduño-Monroy, V. H., Figueroa-Soto, A., Magaña-García, N., Ruiz-Figueroa, A., Gómez-Cortés, J., Jiménez-Haro, A., and Hernández-Madrigal, V. M. (2019). The Mitla Landslide, an event that changed the fate of a mixteco/zapoteco civilization in Mesoamerica. *International Journal of Geophysics*, 2019(1), 5438381.
- Garduño Monroy, V. H., Macías, J. L., Morelli, S., Figueroa Soto, A., Ruiz Figueroa, A., Robles Camacho, J., & Veronica, P. (2020). Landslide impact on the archaeological site of Mitla, Oaxaca. *Geoarchaeology*, 35(5), 644-658.
- Gobierno del estado de Oaxaca, 2024. Zonas Metropolitanas. <https://www.oaxaca.gob.mx/zona-metropolitana/>
- Hernández-Sánchez, R. I. (2016). *Prospection of groundwater in Valles Centrales of Oaxaca using geophysical methods: gravimetry, magnetometry and electrical resistivity*. Master's thesis in Spanish. Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Oaxaca, México.
- Hernández-Sánchez, R. I., Castellanos, F., Herrera-Barrientos, J., y Belmonte-Jiménez, S. I. (2021). Gravimetric determination of storage coefficient and storage change of groundwater in an uncontrolled and unconfined aquifer. *Natural Resources Research*, 30, 4207-4218.

- INAH, Instituto Nacional de Antropología e Historia (2024). *Mediciones de vibración ambiental apoyan la hipótesis de que Mitla fue cubierta por una avalancha de origen sísmico*. Boletín mensual. <https://inah.gob.mx/boletines/mediciones-de-vibracion-ambiental-apoyan-hipotesis-de-que-mitla-fue-cubierta-por-una-avalancha-de-origen-sismico>
- INEGI (2020). Censo Nacional de Población y Vivienda. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2003) [https://ola.imta.gob.mx/ola/atoyac\\_oaxaca](https://ola.imta.gob.mx/ola/atoyac_oaxaca)
- Jerónimo-García, A. G. (2016). *Parámetros de diseño sísmico para algunos estados del pacífico mexicano: Michoacán, Guerrero y Oaxaca* (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.
- Li, Y., Shan, X., Zhu, C., Qiao, X., Zhao, L., & Qu, C. (2020). Geodetic model of the 2018 Mw 7.2 Pinotepa, Mexico, earthquake Inferred from InSAR and GPS data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(3), 1115-1124.
- Márquez-López. M. (2022). *Análisis espacial para la determinación de peligros en la zona urbana de la Ciudad de Oaxaca*. Tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, INICIT. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Márquez-López, M., Figueroa-Soto, A., López Granados, E., Mendoza-Ponce, A., Belmonte Jiménez, S. I., Ávila-Olivera, J. A., and Hernández-Sánchez, R. I. (2024). Mapping Seismic Site Classes in Oaxaca Metropolitan Area, Mexico based on microtremor records. Aceptado en *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
- Melgar D., Ruiz-Angulo A., García E. S., Manea M., Manea V. C., Xu X., and Pérez-Campos X. (2018). Deep embrittlement and complete rupture of the lithosphere during the Mw 8.2 Tehuantepec earthquake. *Nature Geoscience*, 11(12), 955-960.
- México. Universidad Nacional Autónoma de México, I. d. G., Servicio Sismológico Nacional. (2024). *Catálogo de sismos*. Extraído de <http://www2.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>
- Molnar, P., and Tapponnier, P. (1975). Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*, 189(4201), 419-426.
- Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz Álvarez, S. and Gutiérrez, F. O. (1995). Estructura interna de la falla de Oaxaca (México) e influencia de las anisotropías litológicas durante su actividad cenozoica. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12(1), 1.
- Ortega-Gaucin, D., Cruz Bartolón, J. D. L., and Castellano Bahena, H. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México*.
- Ortega-Gutiérrez, F. (1990). North American Continent-Ocean Transects Program Transect H-3: *Acapulco Trench to the Gulf of Mexico across southern Mexico*.
- Secretaría del Medio Ambiente, Energías y Desarrollo Sustentable "SEMAEDESOS". (2021). *Plan Integral para el Saneamiento de los Ríos Atoyac y Salado*.
- Singh, S. K., Corona Fernandez, R. D., Santoyo, M. Á., y Iglesias, A. (2023). Repeating large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Seismological Research Letters*, 95(1), 458-478.

- SSN-Catálogo de sismos grandes (2024). <http://www2.ssn.unam.mx:8080/sismos-fuertes/>
- Suárez G., and Albini P. (2009). Evidence for great tsunamigenic earthquakes (M 8.6) along Mexican Subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 2A, 892-896.
- Talavera-Cervantes, G. y Mendoza-Ponce, A. (2024). Análisis estadístico de la sismicidad reportada por el Servicio Sismológico Nacional en el estado de Oaxaca en H. Morales-Iglesias (Ed.), *Temas selectos de riesgo socioambiental en el Sureste de México* (pp. 99–115). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Wen G., Li X., Zhao Y., Xu C. and Xu G. (2022) Rupture Characteristics Analysis of the 2020 Mw 7.4 Oaxaca, Mexico Earthquake Using Teleseismic, High-Rate GPS, and InSAR Data. *Frontiers of Earth Science*, 10, 951033. doi: 10.3389/feart.2022.95103
- Yan, Z., X. Xiong, C. Liu, and J. Xu (2022). Integrated Analysis of the 2020 Mw 7.4 La Crucecita, Oaxaca, Mexico, Earthquake from Joint Inversion of Geodetic and Seismic Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112, 1271–1283. doi: 10.1785/0120210276
- Zúñiga, F. R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á., & Mendoza, A. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology*, 21, 1295-1322.

# Vulnerabilidad ambiental y riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas

Diana E. Guzmán-Morales<sup>1</sup>, Angel E. Zúñiga-Tovar <sup>2\*</sup>, Marcelino García-Benítez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>2</sup>CONAHCYT- Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>3</sup>CONAHCYT- Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos  
y Cambio Climático Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

\*ezuniga@geografia.unam.mx

## Resumen

Debido a su frecuencia y magnitud, las inundaciones se consideran el desastre con mayor impacto a nivel mundial. En México, más del 50% del total de los desastres ocurridos en 50 años (1970-2020) corresponden a inundaciones. Aunque, gran parte del territorio nacional ha sido afectado por inundaciones, las zonas costeras del país concentran el mayor porcentaje de impactos (~65%), siendo el estado de Chiapas una de las cinco regiones de México con el mayor número de desastres por inundaciones. Si bien, estos desastres son un fenómeno complejo, por lo general, se asocian a eventos de lluvia intensa, sin considerar el contexto de vulnerabilidad en que ocurren. Por esta razón, la presente investigación analiza el efecto del cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) entre 1970 y 2016 en la vulnerabilidad ambiental (VA) de las cuencas hidrológicas y el riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas. Se utiliza el método de Numero de Curva (NC) para generar diferentes escenarios de riesgo de inundaciones, combinando valores de VA y eventos de lluvia intensa (30mm, 50mm, 70mm y 100mm). Para validar el modelo de riesgo, se utilizaron registros históricos de inundaciones en el estado, así como datos de la inundación ocurrida del 01-04 de octubre de 2020 debido a la Tormenta Tropical Gamma (TTG). Los resultados mostraron que la VA y el riesgo de inundaciones aumentaron donde el CCUS mostró mayores cambios. Por tanto, concluimos que la VA asociada con el CCUS es un factor que contribuye con el nivel de riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas.

**Palabras clave:** Número de curva, cambio de cobertura y uso de suelo, lluvia intensa y tormenta tropical Gamma.

## Introducción

Las inundaciones constituyen el fenómeno hidrológico con mayor impacto en la sociedad, prueba de ello es que representan más del 50% de los desastres registrados a nivel mundial (EM-DAT, 2009). Este tipo de desastre, afectan zonas urbanas localizadas en zonas de menor pendiente

y áreas costeras. Por tanto, al producirse un hecho de esta naturaleza, las pérdidas humanas, socioeconómicas e incluso ambientales resultan ser muy elevadas.

Debido a su ubicación geográfica, México es susceptible de ser afectado por fenómenos hidrometeorológicos extremos (por ejemplo, los ciclones tropicales) provenientes del Golfo de México y Océano Pacífico. Se estima que más del 86.8% de los desastres generados por inundaciones entre el año 2000 a 2018 en México (INECC, 2020) afectaron 162,000km<sup>2</sup> del territorio nacional, es decir el 8.24% de la superficie total del país. Esta condición de peligro por lluvias intensas, muestra una estrecha relación con la frecuencia y magnitud de las inundaciones (CENAPRED, 1998-2020; DesInventar, 2020), principalmente en zonas costeras, debido a fenómenos atmosféricos que ocurren en verano (ciclones tropicales) y en invierno (Nortes) (Zúñiga & Magaña, 2018).

El estado de Chiapas que se localiza en la región costera del Pacífico occidental de México, es afectado por inundaciones asociadas con eventos de lluvia intensa proveniente del Pacífico y Golfo de México durante el verano e invierno. De acuerdo con el DesInventar (2020), CENAPRED (1998-2020) y el FONDEN (2018), algunos de los municipios donde se concentra el mayor número de registros de inundaciones son: Tapachula, Acapetahua, Tuxtla Gutiérrez, Suchiate, Huixtla, Villa Comaltitlán, Mazatán, Mapastepec, Pichucalco y Pijijiapan. Debido al número de inundaciones ocurridas en el territorio chiapaneco, se considera el quinto estado de México (después de Tabasco) con la mayor frecuencia de desastres por inundaciones en 43 años (1970-2013). Durante este periodo, se registraron alrededor de 500 eventos de inundaciones urbanas (incluyendo encharcamientos) (DesInventar 2020, CENAPRED, 1998-2020 y FONDEN, 2018). Estos eventos de desastre han aumentado en los últimos 18 años (1995-2013) pasando de un promedio de 10 a 40 anules, por tanto, el nivel de riesgo de inundaciones en el estado es mayor.

Si bien es cierto que los eventos peligrosos de lluvia intensa regulan el comportamiento temporal del riesgo de inundaciones, el contexto ambiental en que estas ocurren se ha documentado como un factor que contribuye activamente con el desarrollo de este tipo de desastres (Zúñiga & Magaña, 2018; 2023). La pérdida del paisaje natural asociada con el crecimiento urbano y al desarrollo de actividades económicas como la agricultura y la ganadería, constituye un factor importante en la evaluación del riesgo de inundaciones, debido al aumento de la vulnerabilidad ambiental en las cuencas hidrológicas por la pérdida de infiltración de los suelos naturales (Gaspari, 2011). Por ello, evaluar y cuantificar en qué medida la degradación de las cuencas se traduce en un mayor riesgo de inundaciones, representa una herramienta importante para el diagnóstico actual y futuro de posibles impactos vinculados a inundaciones urbanas en diferentes regiones del estado de Chiapas.

Debido a que la vulnerabilidad es el único elemento de la ecuación del riesgo (Riesgo = Peligro \* Vulnerabilidad) que puede ser modificado, el presente estudio evalúa la dinámica del riesgo de inundaciones a partir de cambios en la vulnerabilidad ambiental (VA) de las cuencas hidrológicas del estado de Chiapas, con el objetivo de determinar en qué medida la pérdida de infiltración de los suelos asociada al CCUS entre 1970 y 2016 ha contribuido con el nivel de riesgo de inundaciones en diversas regiones de estado

A través del análisis de variables ambientales (vulnerabilidad ambiental) y climáticas (peligro por lluvias intensas), se determinan zonas potenciales de inundación para el estado de Chiapas. La presente propuesta metodológica integra el resultado de la vulnerabilidad ambiental de los



periodos analizados (1970 y 2016) con información de peligro por lluvia intensa, utilizando el método de Número de Curva (NC) desarrollado por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA – NRCS, 1986). El resultado ofrece el desarrollo de escenarios de riesgo de inundación para el estado de Chiapas, considerando las cuencas hidrológicas como unidad de análisis y diferentes valores de peligro. Esta investigación aporta conocimiento novedoso sobre el proceso generador del riesgo a nivel de cuenca hidrológica para esta región del sureste mexicano, al mismo tiempo, puede ser utilizado como un instrumento para la gestión del territorio y la reducción del riesgo de inundaciones, a partir de la conservación y preservación de la cobertura natural en las cuencas hidrológicas.

Finalmente, el trabajo tiene como principal objetivo, analizar y comparar el efecto del cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) entre 1970 y 2016 en la vulnerabilidad ambiental (VA) y el riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas, a través de diseño de escenarios de riesgo para diferentes episodios de lluvia (30mm, 50mm, 70mm y 100mm).

## Área de estudio

El estado de Chiapas con una extensión de 73,311.0 km<sup>2</sup>, se localiza en la región suroeste de México, entre las coordenadas 14° 39' y 17° 57' de latitud norte y 90° 22' y 94° 08' de longitud oeste (figura 1). El territorio chiapaneco se divide en 124 municipios y 81 cuencas hidrológicas. Su orografía presenta diferencias altitudinales que van de -23 msnm hasta 4083 msnm.

## Métodos y materiales

### *a) Vulnerabilidad ambiental*

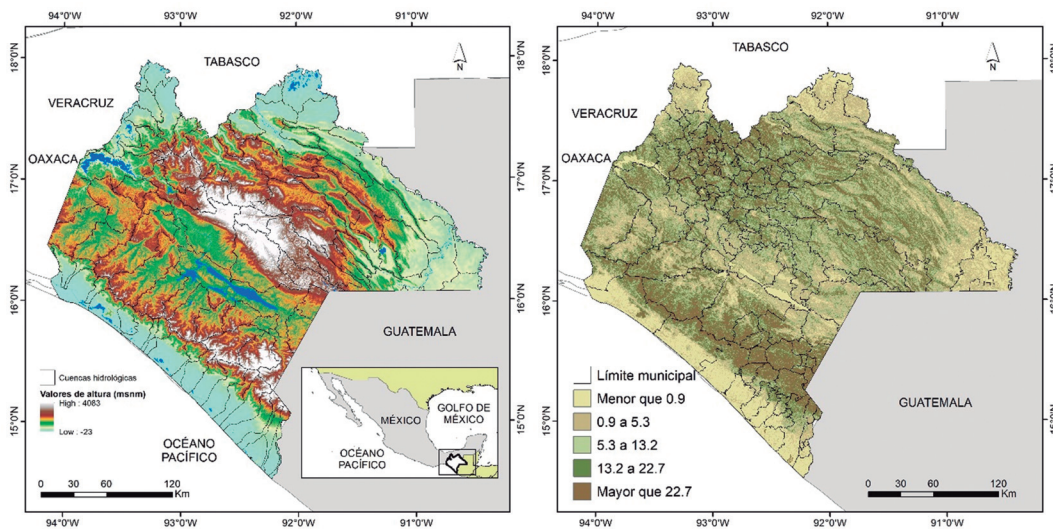
El presente estudio analiza la vulnerabilidad ambiental (VA) como un elemento dinámico del riesgo, desde un contexto orográfico (pendiente del terreno) y ambiental (uso de suelos y edafológica) (Gaspari, 2011). Esta variable, es relativamente nueva en estudios de riesgos de inundaciones en México, debido a que la vulnerabilidad está mayormente asociada con impactos sociales y económicos (Zúñiga & Magaña, 2018; 2023).

La VA se determinó para 90 cuencas hidrológicas que integran el estado de Chiapas. La información se obtuvo del repositorio de datos del (INEGI, s. f.). Para los indicadores dinámicos se utilizó información de uso de suelo y vegetación (1970 y 2016). La información se agrupó en ocho coberturas (Agrícola, Asentamiento humanos, Bosque, Otra vegetación -incluye las coberturas no analizadas-, Pastizal, Selva y Sin vegetación aparente o escasa) debido a su importancia espacial en el estado. También, se utilizó información edafológica sobre permeabilidad de los suelos o grupo hidrológico (GH) (A=infiltración máxima, B=infiltración moderada, C=infiltración baja y D=infiltración muy baja). Con apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) se combinó la información de uso de suelo y vegetación con la capacidad de infiltración de los suelos. A través de tablas estandarizadas (USDA – NRCS, 1986; Domínguez, 2008), se asignaron valores de Número de Curva (NC) para definir la capacidad de infiltración en los suelos.

El indicador estático se obtuvo del continuo de elevaciones mexicano (CEM) del (INEGI, s. f.). Utilizando el método de Pedraza (1996) se calculó la pendiente del terreno en un SIG (figura 2). El indicador estático se utilizó para ajustar los valores asignados de NC. Aunque, el método de NC se diseñó para pendientes <1% (3°), es decir zonas semi-planas y onduladas, diversos autores (Askar, 2013; Villarroya et al., 2013) sugieren ampliar los valores de pendiente para áreas con variaciones altitudinales importantes, debido a que los escurrimientos dependerán en mayor medida de la orografía más que del tipo de suelo.

**b) Umbrales de peligro por lluvias intensas**

Para determinar umbrales de lluvia intensa que puedan ser considerados un peligro para el estado de Chiapas, se utilizó el Inventario de Desastres para identificar eventos de inundación para el periodo de estudio (1970-2016). Esta información se asoció con valores de intensidad de lluvia de 31 estaciones climatológicas seleccionadas a partir de: *i)* la proximidad de la estación a la zona urbana con registro de inundaciones; *ii)* su proximidad a cuerpos de agua con reporte de desbordamiento y *iii)* su posición dentro de las cuencas hidrológicas. A partir del análisis realizado, se diseñaron máscaras con valores de peligro (30, 50, 70 y 100 mm) que agruparan las diferentes intensidades de lluvia intensa. Información vectorial de (CONABIO, s. f.) fue utilizada para obtener las mascararas de peligro. La integración de campos numéricos de peligro con datos vectoriales se realizó a través de técnicas de geoprocésamiento en un ambiente SIG. Los archivos vectoriales se convirtieron a ráster para generar los escenarios de inundación.



**Figura 1** (izquierda). Localización del estado de Chiapas. **Figura 2** (derecha). Distribución espacial de valores de pendiente del terreno para el estado de Chiapas.

A continuación (figura 3), se muestra el procedimiento utilizado para obtener valores de VA utilizando tablas estandarizadas del NC ajustadas con los valores de pendiente del terreno, bajo un contexto de humedad antecedente normal. Los valores finales de VA se normalizaron utilizando la ecuación (2).

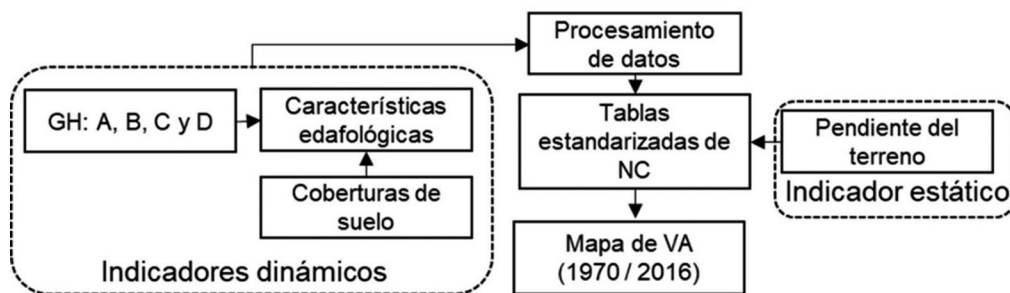


Figura 3. Diagrama de flujo utilizado para obtener el mapa de vulnerabilidad: 1970 y 2016.

### c) Cálculo del método de número de curva (NC)

A través del método del número de curva (NC) (USDA – NRCS, 1986; 2009), se evaluó potencial de las cuencas para generar escurrimientos, de acuerdo con el tipo de suelo y sus características físicas. El método de número de curva puede describirse matemáticamente como una relación empírica entre Gasto (Q) y Precipitación (P) descrita por Aparicio (2008) (ecuación 1).

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{NC} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{NC} - 20.32}, \quad (1)$$

donde: Pe = Potencia del escurrimiento (mm), P = Lámina de lluvia (mm), NC = Valor de número de curva (adimensional). Otros valores en la ecuación son parámetros constantes, que son utilizados para el cambio de unidades (pulgada – mm).

El NC corresponde a la vulnerabilidad ambiental. Los valores generados, se establecen de 0 a 100, donde 0 representa mínimo escurrimiento y 100 máximo escurrimiento.

### d) Cálculo del índice de riesgo de inundaciones

Los escenarios de riesgo de inundaciones resultaron de combinar valores de VA y peligro por lluvia intensa, así como de información de la Tormenta Tropical Gamma en la ecuación 1. Con apoyo de un SIG se diseñaron los escenarios de índice de riesgo de inundaciones. Para una mejor representación y análisis de la información de VA y los escenarios de riesgo de inundaciones, los valores se normalizaron utilizando la ecuación (2) "Scalling". Este método permite obtener valores en un rango de 0 – 1, donde el valor 0 corresponde a valores nulos, mientras que el valor 1 corresponde a valores máximos.

$$X' = \left(\frac{X}{X_{min}}\right) / \left(\frac{X_{max}}{X_{min}}\right) \quad (2)$$

donde: X' = Indicador estandarizado, X = Valor que será estandarizado, X<sub>max</sub> y X<sub>min</sub> = Valores extremos de la serie de datos.

A partir de la escala de valores generados para la VA y el riesgo de inundaciones, se clasificó la información en 5 niveles. 0.0 – 0.2 (muy bajo), 0.2 – 0.4 (bajo), 0.4 – 0.6 (moderado), 0.6 – 0.8 (alto) y 0.8 – 1.0 (muy alto).

### ***e) Validación del modelo de riesgo de inundaciones***

La distribución espacial de registros históricos de desastres por inundaciones, se realizó con información del Inventario de Desastres (DesInventar Project - Official Website, s. f.) Esta plataforma, contiene un inventario de desastres con temporalidad de 1970 a 2015. Otra plataforma consultada fue (CENAPRED, s. f.). Los registros con un periodo de 1990 a 2020 corresponden a eventos de inundación de gran magnitud.

Para asegurar la confiabilidad de los registros, se aplicaron filtros de confianza para: *i)* eliminar información duplicada; *ii)* validar congruencia en los registros y *iii)* eliminar registros no útiles para la investigación. La información se estandarizó para su manejo geométrico en un SIG. El uso de técnicas de geoprocésamiento permitió integrar los registros históricos de inundaciones con los límites municipales del estado de Chiapas. La información municipal se obtuvo de (CONABIO, s. f.).

### **Caso de estudio: Tormenta Tropical Gamma**

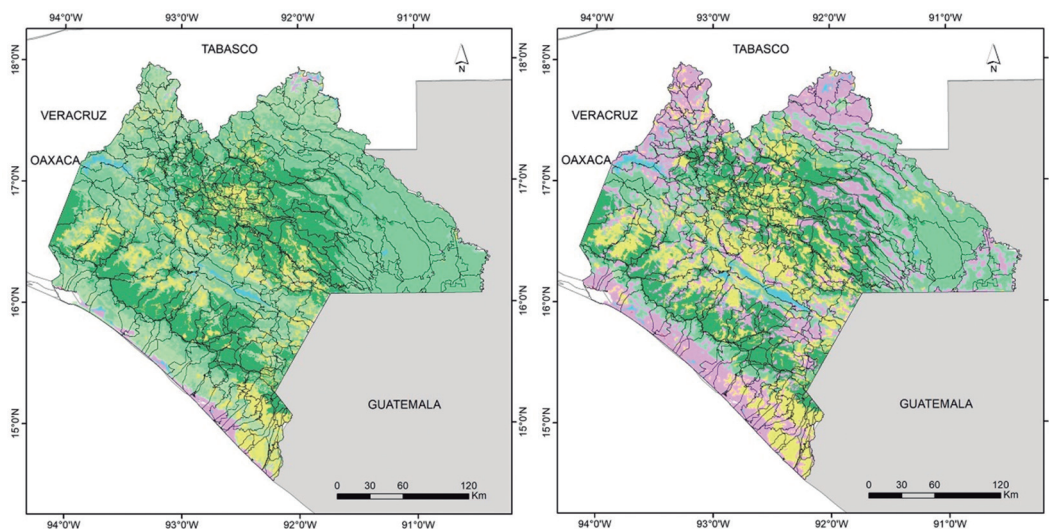
El escenario de riesgo de inundación asociado a la Tormenta Tropical Gamma ocurrida los días 1 – 4 de octubre de 2020, se generó utilizando datos de lluvia del repositorio Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Cloud Classification System (PERSIANN-CCS) (CHRS Data Portal, s. f.). Esta información es ampliamente utilizada para el análisis de lluvias y la modelación de inundaciones, por lo cual, se consideró una fuente de datos confiable. La información de tasa de lluvia, se utilizó para validar la magnitud espacial de las zonas con potencial de inundación en Chiapas.

## **Resultados y conclusiones**

### ***a) Análisis del cambio de uso de suelo***

Después de analizar la transformación del territorio chiapaneco, se determinó que aproximadamente 25,000km<sup>2</sup> de la cobertura natural se perdió durante el periodo de estudio (1970 y 2016), lo que equivale al 41% de esta cobertura natural. La superficie de bosque, selva y pastizales registraron las mayores pérdidas con 14%, 29% y 97%, respectivamente. Esta situación, muestra relación con el aumento de la cobertura agrícola (66%), así como por la cobertura urbana y otro tipo de vegetación que incrementaron su superficie en más de 1,000%, al pasar de 35.3km<sup>2</sup> a 500 km<sup>2</sup> y de 1,300 km<sup>2</sup> a 20,405 km<sup>2</sup>, respectivamente. En consecuencia, la vegetación natural fue sustituida por superficies con poca o nula permeabilidad, tal y como se observa en la figura 4, donde la superficie agrícola aumentó desde 1970, y con ello, la fragmentación del

paisaje natural. También la cobertura Otra vegetación se extendió en gran parte del norte, sur y centro del estado. Este tipo de cobertura se caracteriza por ser vegetación en transición (por ejemplo, bosque a pastizal), por tanto, su clasificación resulta complicada. En general este tipo de cobertura de suelo (otra vegetación) se presenta donde los procesos ambientales climáticos y sociales son altamente dinámicos”. Este fenómeno socioambiental, se ha documentado como responsable del aumento en la frecuencia de inundaciones urbanas (Shanableh *et al.*, 2018; Abdulkareem *et al.*, 2018). Otros estudios, mencionan que la degradación de las cuencas hidrológicas por actividad antrópica está relacionada con el incremento de escurrimientos superficiales (35% a 50%) (Zúñiga & Magaña, 2018).



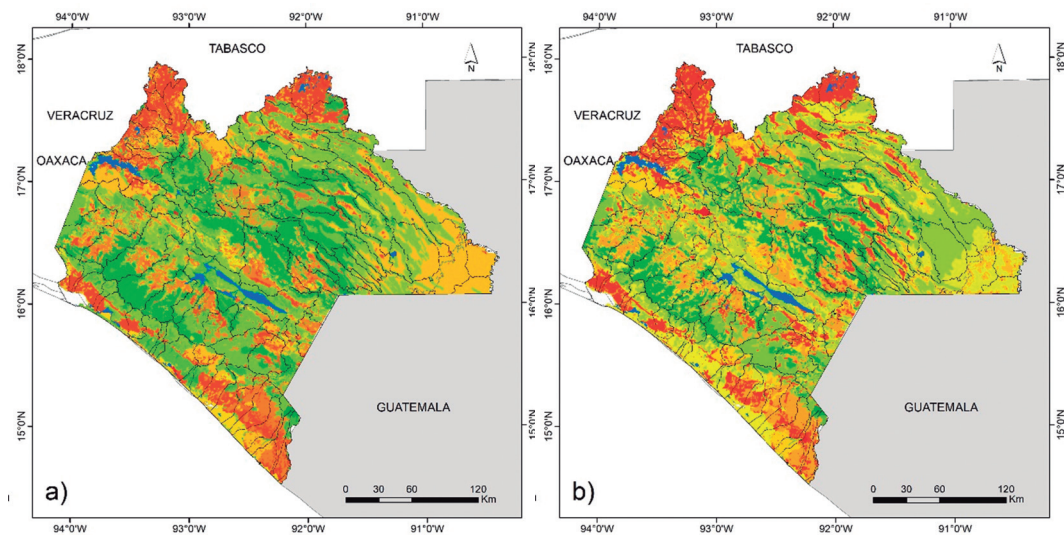
**Figura 4.** Distribución espacial de coberturas de suelo. 1970 (Izq.) y 2016 (Der.).

### ***Índice de vulnerabilidad ambiental***

La vulnerabilidad ambiental es uno de los elementos que integran la ecuación del riesgo junto con el peligro. Esta variable es la única que puede ser modificada. Por ello, este estudio se concentró en evaluar el efecto del cambio de cobertura de suelo en la VA de las cuencas hidrológicas. El resultado mostró que los valores asignados de NC a la información combinada de cobertura de suelo y permeabilidad (GH: A, B, C y D), están presentados por 26 valores que van del 13 al 100 (figura 5). Esto significa que las zonas con valores de NC bajos corresponden a una VA “baja”, debido a que predominan las coberturas naturales con mayor capacidad de infiltración en zonas con pendientes del terreno suave, lo que favorece la infiltración. Por otro lado, los valores cercanos a NC =100 se asocia a suelos con nula capacidad de infiltración y pendientes del terreno que favorecen los escurrimientos superficiales.

Con base en la distribución espacial de valores de NC, es posible identificar cambios significativos en la vulnerabilidad ambiental en las cuencas hidrológicas. Esta condición ambiental se debe principalmente a la pérdida de coberturas naturales, tal y como, se analizó en secciones anteriores.

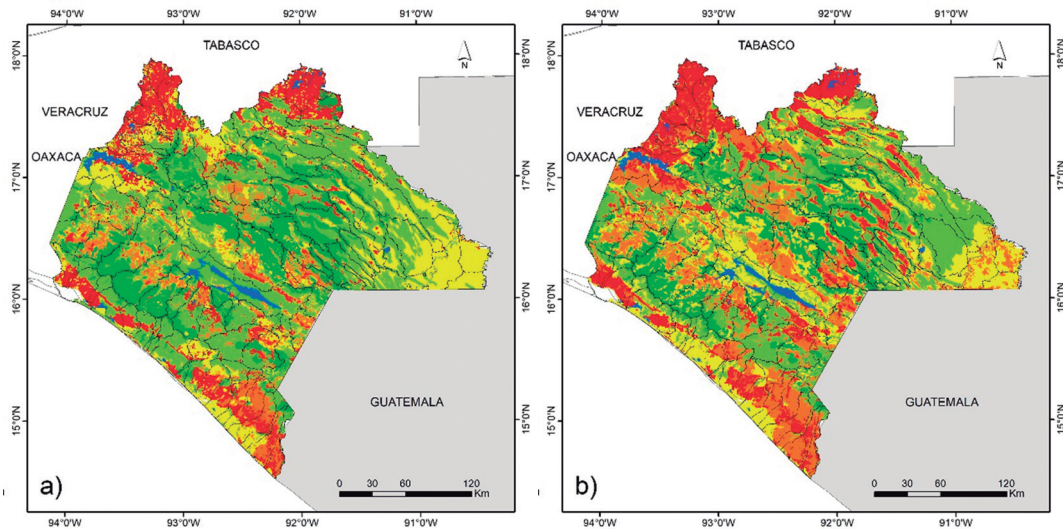
El proceso de transformación del territorio chiapaneco, se tradujo en áreas con valores de NC >50 (aproximadamente 55,200 km<sup>2</sup>), lo que equivale a un poco más del 75% de la superficie del estado de Chiapas. Este incremento en la VA entre 1970 y 2016 se observa principalmente en las regiones centro, norte y costa (figura 5b), donde existe un mayor potencial de las cuencas para generar escurrimientos superficiales, y con ello, un mayor riesgo de inundaciones e impactos en la población y su economía. Aunque, en 1970 también se observan valores altos de NC en diversas regiones del estado de Chiapas (por ejemplo: norte y sur) (figura 5a), la distribución espacial de valores de NC al interior del estado muestra condiciones ambientales favorables para regular los escurrimientos (NC<50). Sin embargo, su capacidad de infiltración muestra cambios importantes en 2016, debido al aumento de valores de NC>50 (figura 5b).



**Figura 5.** Distribución espacial de valores de número de curva. 1970 (a) y 2016 (b).

Después de ajustar los valores de NC con información de la pendiente del terreno, fue posible obtener niveles de vulnerabilidad ambiental para las cuencas hidrológicas del estado de Chiapas. Los niveles de VA normalizados (Ecu. 2): 0.0 – 0.2 (Muy baja), 0.2 – 0.4 (Baja), 0.4 – 0.6 (Moderada), 0.6 – 0.8 (Alta) y 0.8 – 1.0 (Muy alta), permitieron identificar zonas donde la capacidad de infiltración de los suelos es limitada, y con ello, mayor posibilidad para generar escurrimientos superficiales.

El resultado muestra cambios importantes en los niveles de VA. Entre 1970 y 2016 el nivel moderado aumentó de 4.4% a 22%, y con ello, la reducción del nivel “bajo” que cambió de 40.1% a 29% durante el mismo periodo. Otros cambios observados, fue la disminución de los niveles “muy bajo” (14%) y “alto” (19%), como resultado del aumento de la superficie con valores “muy alto” (16%). Estos cambios reflejan el aspecto dinámico de la VA, debido a la pérdida de vegetación natural en las cuencas hidrológicas. Aunque, es posible identificar valores “moderados” a “muy altos”, la frecuencia de inundaciones en diversas regiones del estado es baja (figura 6.) Esta condición de menor riesgo se asocia principalmente con la limitada exposición urbana y poblacional.



**Figura 6.** Niveles de Vulnerabilidad ambiental. 1970 (a) y 2016 (b).

### ***b) Peligro por lluvias intensas***

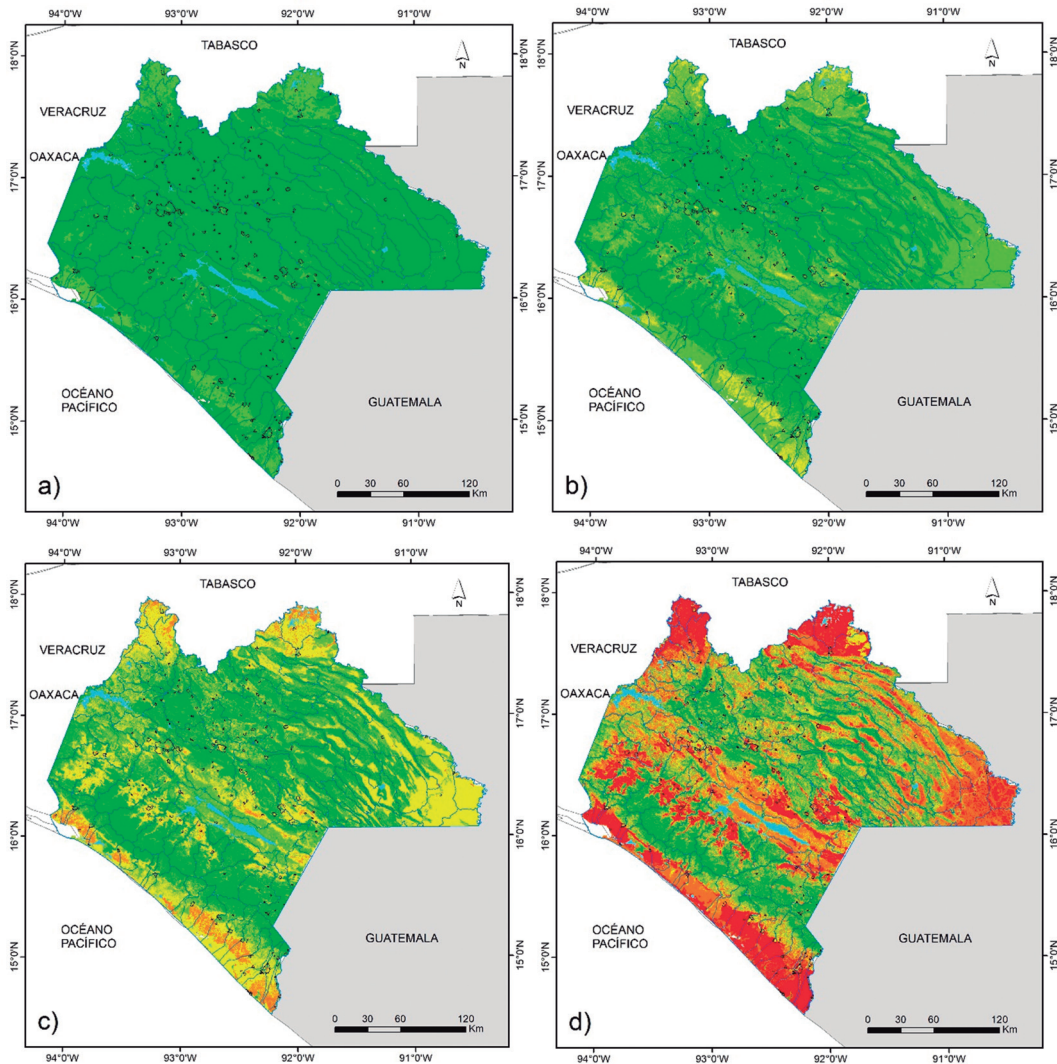
Como resultado del análisis de datos de lluvia diaria y los registros de desastres, fue posible identificar que la intensidad de lluvia que mayormente se asocia a inundaciones en el estado de Chiapas es mayor a 50mm/d, debido a que este valor representa más del 70% de los casos revisados. Otros eventos de inundación (30%), corresponden a intensidades inferiores a 50mm/d, que se relacionan con eventos de lluvia acumulada (por ejemplo, dos días). Debido a lo complejo que resulta establecer una unidad de magnitud para representar los eventos peligrosos, se establecieron cuatro umbrales de lluvia intensa (30mm, 50mm, 70mm y 100mm) para el diseño de los escenarios de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas.

### ***c) Escenarios de riesgo de inundación***

Después de aplicar la ecuación (1) del NC, identificamos cambios en el nivel de riesgo de inundaciones, asociado con la VA y el peligro por lluvias intensas. Los valores de riesgo estandarizado correspondiente a 30mm (figura 7a y 8a), 50mm (figura 7b y 8b), 70 mm (figura 7c y 8c) y 100mm (figura 7d y 8d) mostraron que entre menor es la intensidad de lluvia, la capacidad de regulación de escurrimientos es mayor, y con ello, un menor nivel de riesgo de inundaciones, mientras que para intensidades mayores (por ejemplo, 50mm) esta capacidad hidrológica se reduce significativamente.

Durante el periodo 1970 se observan cambios importantes en el nivel del riesgo ante eventos de lluvia  $\geq 50\text{mm}$  (figura 7b, c y d). A partir de este umbral, se puede establecer mayor potencial para ocurrir una inundación. Después de analizar la dinámica espacial del riesgo de inundaciones en los escenarios, encontramos que el 40% y el 60% de las localidades urbanas están en condición de riesgo “muy bajo” y “bajo” con eventos de 30mm/d (figura 7a). Para 50mm/d, más del 60% de localidades se encuentra en nivel “moderado” (figura 7b). Finalmente, para eventos de lluvia de 70mm/d (figura 7c) y 100mm/d

(figura 7d), las localidades se encuentran en niveles de riesgo “alto” y “muy alto”, respectivamente. Indudablemente, en la medida que la intensidad de lluvia se incrementó la capacidad hidrológica de los suelos se redujo. Sin embargo, donde la VA conserva mejor condición ambiental el efecto fue menor.



**Figura 7.** Distribución espacial de valores de riesgo de inundación para intensidades de lluvia a) 30mm, b) 50mm, c) 70mm y d) 100mm. Periodo 1970.

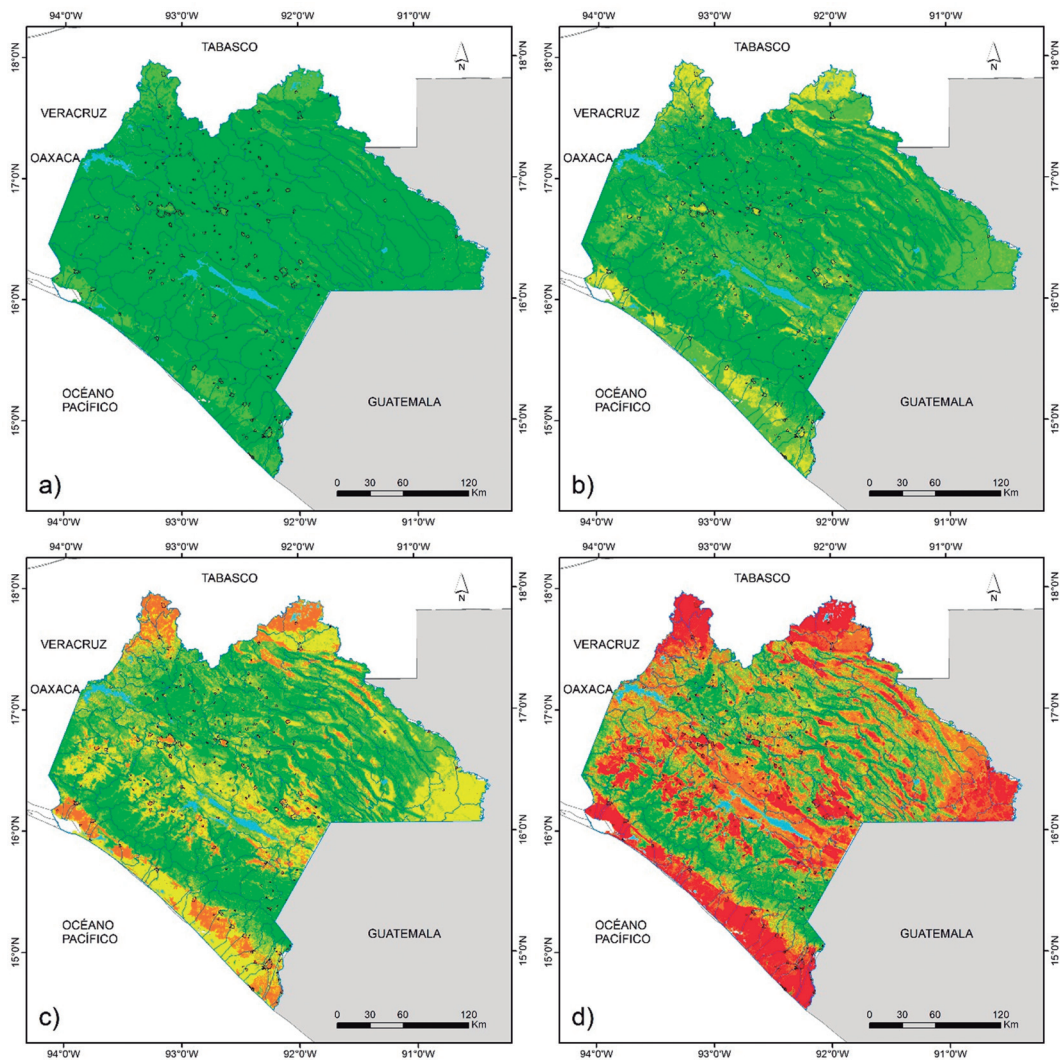
En general, la distribución espacial del riesgo de inundaciones observado en el escenario 2016 (figura 8a, b, c y d) presenta un patrón similar al registrado para 1970 (figura 7), sin embargo, el nivel de riesgo para este nuevo escenario presentó cambios importantes en antes los diferentes peligros (30mm, 50mm, 70mm y 100mm). Este incremento en el nivel de riesgo responde a los cambios en la VA (figura 6b). Como resultado del análisis del escenario de 30mm, más del 80% de las localidades se encuentran en riesgo bajo (figura 8a), lo que significa 20% más que en 1970. Para valores de 50mm, el 80%



de las localidades presenta riesgo moderado (figura 8b). Finalmente, más del 86% de las localidades se encuentran en niveles de riesgo "alto" y "muy alto" para los escenarios de 50mm y 70mm (figura 8c y 8d), lo que significa poco más del 20% con respecto al periodo 1970. El comportamiento del riesgo para 2016 responde a la misma condición ambiental que en 1970, aunque con mayor intensidad, debido al proceso de transformación de las cuencas en un periodo de 46 años (1970-2016).

**d) Análisis de inundaciones en el estado de Chiapas.**

Después de analizar los registros históricos de desastres, identificamos que 31 de los 123 municipios del estado de Chiapas concentran el 75% del número total de inundaciones urbanas ocurridas en 46 años (1970-2016) (tabla 1).



**Figura 8.** Distribución espacial de valores de riesgo de inundación para intensidades de lluvia a) 30mm, b) 50mm, c) 70mm y d) 100mm. Periodo 2016.

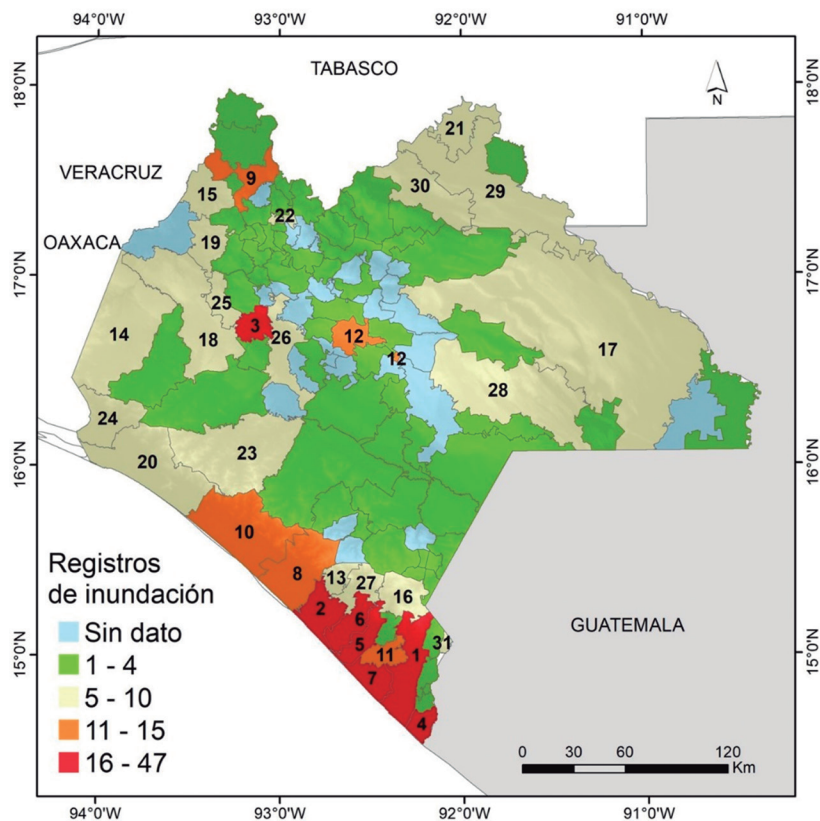
La distribución espacial de las inundaciones históricas muestra que la zona costera, norte, poniente y centro del estado son las más afectadas por este desastre (figura 9). Cuando comparamos esta información con los escenarios de riesgo (figura 7 y 8), es posible establecer que existe una alta correspondencia con el patrón espacial de zonas afectadas, para intensidades de lluvia  $\geq 50\text{mm/d}$ . Aunque, para ambos periodos (1970 y 2016), el escenario de  $70\text{mm/d}$  muestra una mayor eficiencia para representar la distribución de desastres históricos (figura 9), es necesario resaltar que las diferencias espaciales entre los escenarios de riesgo (1970 y 2016) y el mapa de desastres históricos resultan de la unidad de análisis utilizada. Para los escenarios se utilizaron las cuencas hidrológicas, mientras que el mapa de desastres se generó a partir de límites municipales, por tanto, sobreestima espacialmente los valores de riesgo.

**Tabla 1.** Principales municipios afectados por inundaciones. Periodo 1970-2016.

ID	Municipio	No. Eventos	ID	Municipio	No. Eventos	ID	Municipio	No. Eventos
1	Tapachula	47	12	San Cristóbal de las Casas	12	22	Ixhuitán	6
2	Acapetahua	24	13	Acacoyagua	8	23	Villa Corzo	6
3	Tuxtla Gutiérrez	21	14	Cintalapa	8	24	Arriaga	5
4	Suchiate	20	15	Ostuacán	8	25	Berriozábal	5
5	Huixtla	19	16	Motozintla	7	26	Chiapa de Corzo	5
6	Villa Comaltitlán	19	17	Ocosingo	7	27	Escuintla	5
7	Mazatán	17	18	Ocozocoautla de Espinosa	7	28	Las Margaritas	5
8	Mapastepec	15	19	Tecpatán	7	29	Palenque	5
9	Pichucalco	14	20	Tonalá	7	30	Salto de Agua	5
10	Pijijiapan	14	21	Catazajá	6	31	Unión Juárez	5
11	Huehuetán	12						

### ***e) Evaluación del índice de riesgo (caso de estudio)***

La evaluación del modelo de riesgo basado en la VA de las cuencas hidrológicas, se comparó con las zonas impactadas la Tormenta Tropical Gamma ocurrida los días 01 – 04 de octubre de 2020 (figura 10). Esta tormenta tropical afectó a 107 de los 123 municipios que integran el estado de Chiapas. Las regiones norte, este y sur (costa) concentran la mayor intensidad de lluvia. También algunas regiones del centro muestran núcleos importantes de lluvia intensa. Después de calcular el riesgo de inundaciones (figura 10b), se establece que el modelo es eficiente para reproducir las zonas impactadas por lluvia intensa. Los valores de riesgo “muy bajo” y “bajo” corresponden a las zonas donde la VA presenta valores similares (figura 6). Esta relación entre riesgo y VA también se observa para los niveles “moderado”, “alto” y “muy alto”. Con base en los resultados, el modelo de riesgo mostró una efectividad superior al 85% para reproducir las regiones afectadas por lluvia intensa, así como las zonas no impactadas. Finalmente, el 15% restante, se asocia con deficiencias en los registros de lluvia del producto PERSIANN.

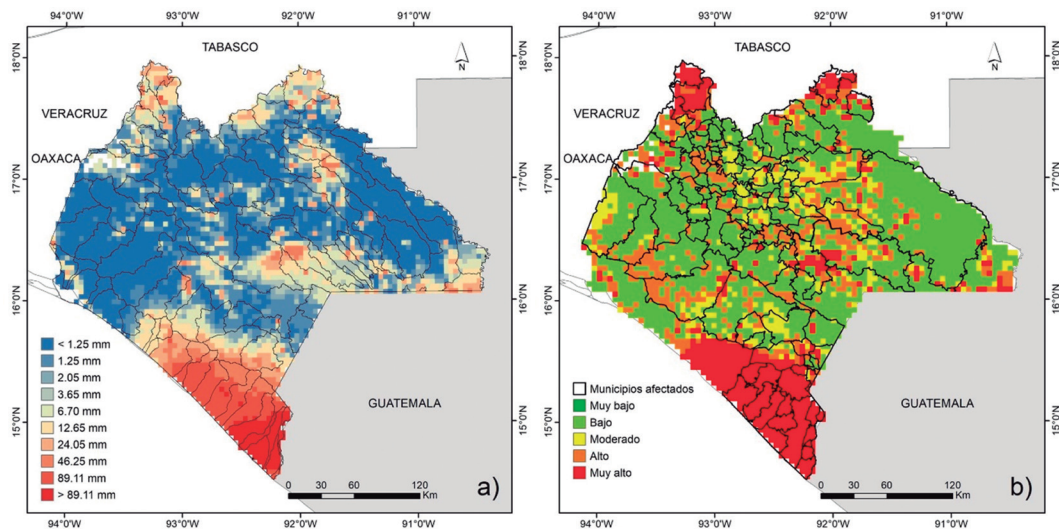


**Figura 9.** Número de inundaciones por municipio (1970-2016). Los números corresponden a los municipios con mayor registro de desastres (tabla 1).

## Conclusiones

Diversos estudios (Zúñiga & Magaña, 2018) mencionan que las lluvias intensas son un elemento que regula el comportamiento temporal del riesgo de inundaciones, sin embargo, en los últimos años, la vulnerabilidad ambiental ha mostrado ser un componente importante en la dinámica actual de las inundaciones en México, principalmente en las regiones costeras, donde el efecto del cambio de uso de suelo ha generado mayores impactos en los ecosistemas terrestres (Pérez, 2002).

El desarrollo de escenarios de riesgo para diferentes episodios de lluvia intensa (30mm, 50mm, 70mm y 100mm) relacionados con inundaciones históricas, permitió evaluar la dinámica de la vulnerabilidad ambiental ante eventos peligrosos de lluvia intensa, y con ello, analizar cambios espaciales en el nivel de riesgo de inundaciones en las cuencas hidrológicas del estado de Chiapas. El aumento de zonas potenciales de inundación en gran parte del territorio chiapaneco en los últimos 46 años (1970-2016), esta relacionado directamente con cambios en el nivel de VA. Por tanto, los niveles de riesgo se deben principalmente a la pérdida de coberturas naturales.



**Figura 10.** Distribución espacial de valores de lluvia acumulados (mm), asociados a la Tormenta Tropical Gamma ocurrida durante el 1-4 de octubre de 2020 (a). Escenario de riesgo de inundaciones, que integra la vulnerabilidad ambiental (2016) con valores de lluvia de la Tormenta Tropical Gamma (b).

El modelo de riesgo propuesto fue capaz de reproducir la distribución espacial de desastres históricos en 75% e identificar las zonas afectadas por lluvias intensas asociadas a la Tormenta Tropical Gamma, con un porcentaje de 85%. Sin embargo, es necesario considerar otros elementos ambientales y antrópicos (muestreo en campo, densidad de la vegetación natural, profundidad de suelos, deforestación, etcétera) en estudio futuros, con el objetivo de mejorar la resolución espacial de los resultados, y con ello, obtener mayor precisión en la distribución de niveles de riesgo.

Finalmente, el desarrollo de un modelo de riesgo de inundaciones para el estado de Chiapas, no sólo permitió comparar dos periodos de tiempo (1970-2016), sino que permitió identificar espacialmente la dinámica del riesgo como resultado de combinar diferentes intensidades de lluvia con la VA de las cuencas hidrológicas. Por lo que, este trabajo representa un esfuerzo que busca contribuir con la gestión del territorio y la reducción de impactos, a través de la conservación y preservación de los servicios ambientales que proveen las cuencas hidrológicas.

## Agradecimientos

Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT-2024). Agradecemos a Gustavo Vázquez Cruz por su apoyo en cómputo científico. Esta investigación recibió apoyo financiero del CONAHCYT a través de la “Cátedra Patrimonial” para AEZT. También se agradece el apoyo del Instituto de Geografía – Universidad Nacional Autónoma de México.

## Referencias

- Abdulkareem, J. H., Sulaiman, W. N. A., Pradhan, B., & Jamil, N. R. (2018). Relationship between design floods and land use land cover (LULC) changes in a tropical complex catchment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(14), 1-17.
- Aparicio, F. (2008). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico: Limusa.
- Askar, M. K. (2013). Rainfall-runoff model using the SCS-CN method and geographic information systems: a case study of Gomol River watershed. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 178, 159-170.
- Canepred (1998-2020) Impacto socioeconómico de los desastres en México 1998-2020. *Serie Impactos Socioeconómicos de los Desastres en México*, No 1-10, secretaria de Gobernación.
- CHRS Data Portal. (s. f.). <https://chrsdata.eng.uci.edu/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s. f.). Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad [16,881] - CONABIO. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- DesInventar. (2020). Sistema de Inventario de Desastres para México. <https://online.desinventar.org/>.
- DesInventar Project - Official website. (s. f.). <https://www.desinventar.org/software.html>
- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., & Carrizosa, E. E. (2008). *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 89 pp.
- EM-DAT (2009). The International disaster database (en línea) Emergency Events Database, Université Catholique de Louvain, Brussels. Centre for search on the epidemiology of disaster (RED).
- Fondo de Desastres Nacionales, FONDEN. (2018). Sistema Nacional de Protección Civil, México.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Delgado, M. I., Senisterra, G. E., & Denegri, G. A. (2011). Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG. *Multequina*, 20(1), 03-13.
- INECC (2020). Sistemas de alerta temprana y reducción de riesgos por inestabilidad de laderas asociados a deforestación y degradación por cambio climático.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s. f.). <https://www.inegi.org.mx/>
- Pedraza J. (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial, Madrid, 414 pp.
- Pérez Vega, A., & Ortiz Pérez, M. A. (2002). Cambio de la cubierta vegetal y vulnerabilidad a la inundación en el curso bajo del río Papaloapan, Veracruz. *Investigaciones geográficas*, (48), 90-105.
- Shanableh, A., Al-Ruzouq, R., Yilmaz, A. G., Siddique, M., Merabtene, T., & Imteaz, M. A. (2018). Effects of land cover change on urban floods and rainwater harvesting: a case study in Sharjah, UAE. *Water*, 10(5), 631.
- USDA – NRCS (1986), Urban Hydrology for Small Watershed, U. S. Department of Agriculture, National Resources Conservation Service, Engineering Division. *Technical Release 55*, 210-VI-TR-55, cap. 2, 2da edición, 1-6.
- (2009). Hydrologic Soil Group, Chapter 7 part 630. *Hydrology National Engineering Handbook*.

- Villarroya, J. P., Farías, H. D., & Amarilla, M. E. (2013). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante SIG y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo.
- Zúñiga, E., & Magaña, V. (2018). Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land uses cover change. *Investigaciones geográficas*, (95).
- Zúñiga, E., Magaña, V. (2023). Impact of Land Use Cover Change (LUCC) on Floods: Acapulco de Juárez Bay, Mexico. In: Leal Filho, W., Aguilar-Rivera, N., Borsari, B., R. B. de Brito, P., Andrade Guerra, B. (Eds.), *SDGs in the Americas and Caribbean Region. Implementing the UN Sustainable Development Goals – Regional Perspectives*. Springer, Cham.

# Caracterización morfométrica de la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México

Daniel Alejandro Gallegos-Pérez<sup>1</sup>, Marcelino García-Benítez<sup>2\*</sup>,  
Osías Ruiz-Álvarez<sup>3</sup>, Walter López-Báez<sup>4</sup> y Gabriela Narcizo de Lima<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático.  
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

<sup>2</sup>Cátedra IXM CONAHCYT. Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático.  
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Email

<sup>3/4</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

<sup>5</sup>Geography Department. Faculty of Letters. Porto University.

\*marcelino.garcia@unicach.mx

## Resumen

**E**l objetivo de este trabajo fue la caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Sabinal (CRS) y evaluar el comportamiento hidrológico del sistema de drenaje superficial. Se trabajó a partir de un Modelo de Elevación Digital (MDE) del terreno de alta resolución con tecnología de detección remota LiDAR (*Light Detection and Ranging*) y cartas topográficas en formato vectorial. El procesamiento se realizó en el programa QGIS y la estimación de parámetros en una hoja de Microsoft Excel. Los hallazgos de la red de drenaje sugieren que la CRS tiene un patrón de drenaje dendrítico, una textura de drenaje moderada y una red fluvial de orden siete según el método de Strahler. Los valores obtenidos de relación de bifurcación, densidad de drenaje, relación de circularidad, frecuencia de la corriente, relación de elongación, intensidad de drenaje y factores de forma indican que la cuenca produce un pico más plano de escorrentía directa durante más tiempo y presenta condiciones naturales de riesgo de inundación en algunas zonas específicas. Por su parte, los números de infiltración sugieren la ocurrencia de escurrimiento superficial y erosión del suelo debido a los valores bajos de infiltración encontrados.

**Palabras clave:** Subcuenca Tuxtla Gutiérrez, Datos LIDAR, SIG, parámetros hidrológicos y Riesgo a inundación.

## Introducción

La caracterización morfométrica de cuencas aporta información esencial para el manejo y gestión de los recursos hídricos, a nivel global se utiliza para describir cuantitativamente la forma de la red de drenes de una cuenca hidrográfica, la comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas, el control de inundaciones, en la elaboración de estudios socioecológicos e hidrológicos,

para la gestión de la tierra y sus recursos hídricos en territorios con datos hidrológicos limitados, en la obtención de parámetros topográficos, geológicos y climáticos, para precisar áreas con alto escurrimiento y erosión, en la identificación del potencial de los recursos hídricos de las cuencas, como insumo en la construcción de instrumentos para la toma de decisión y el establecimiento de un manejo de cuenca efectivo (Ameri *et al.*, 2018; Caicedo-Toro *et al.*, 2021; López-Ramos *et al.*, 2022).

En México, las características morfométricas son un componente requerido en la realización de estudios hidrológicos, en análisis de susceptibilidad a inundaciones y constituyen un recurso en la modelación hidrológica de cuencas (Guevara Gutiérrez *et al.*, 2019; Hernández, 2022; López Huerta *et al.*, 2022). En el sureste de México, los estudios de morfometría son indispensables para la priorización de microcuencas desde el punto de vista de su aporte, conservación y restauración de recursos naturales (López-Pérez y Fernández-Reynoso, 2021). El estado de Chiapas es un ejemplo particular de la ausencia de estudios sobre caracterización morfométrica de cuencas, a pesar de su situación fisiográfica que contribuye a la generación de escurrimientos con alto nivel de captación de agua superficial lo que podría deberse a lo tedioso y extenso que puede resultar esta técnica, principalmente si se realiza mediante procedimientos convencionales (Nath *et al.*, 2022). En este aspecto, López Báez *et al.* (2016) definieron algunos parámetros morfométricos, con el fin de estimar la capacidad de infiltración en la cuenca del río Cuxtepeques. Por su parte, en la subcuenca del río Huehuetán, López-Pérez y Fernández-Reynoso (2021) estudiaron los parámetros morfométricos y la cobertura vegetal para fines de manejo.

El objetivo de este trabajo fue la caracterización morfométrica de la CRS a partir de la creación de un modelo digital de elevación de alta resolución, con la información obtenida en este estudio será de gran importancia para la gestión de la cuenca, ya que contribuye a la identificación de zonas susceptibles por generación de crecidas, además que contribuye a mejorar mecanismos para la gestión a riesgo por inundaciones ante la variabilidad climática por efectos del cambio climático en las zonas urbanas.

La caracterización morfométrica es una metodología necesaria en estudios a nivel de cuenca, ya que suministra datos útiles aplicados para una gran variedad de propósitos, adoptada por científicos de todo el mundo, debido a que permite conocer de manera cuantitativa el estado hidrológico de la cuenca; y por el aporte significativo de información de apoyo para el manejo del agua y el suelo. Un estudio de caracterización morfométrica de la CRS, que precisen sus límites y la metodología de obtención de sus parámetros, permitiría una mejor comprensión de su respuesta hidrológica ante futuros fenómenos hidro-climáticos extremos (Angillieri, 2012; Solano y Martínez, 2021; Caicedo-Toro *et al.*, 2021).

## Métodos

### **Área de estudio**

La CRS se encuentra al sureste de México, en el estado de Chiapas (figura 1), en la cuenca Río Grijalva – Tuxtla Gutiérrez perteneciente a la Región Hidrológica Grijalva – Usumacinta



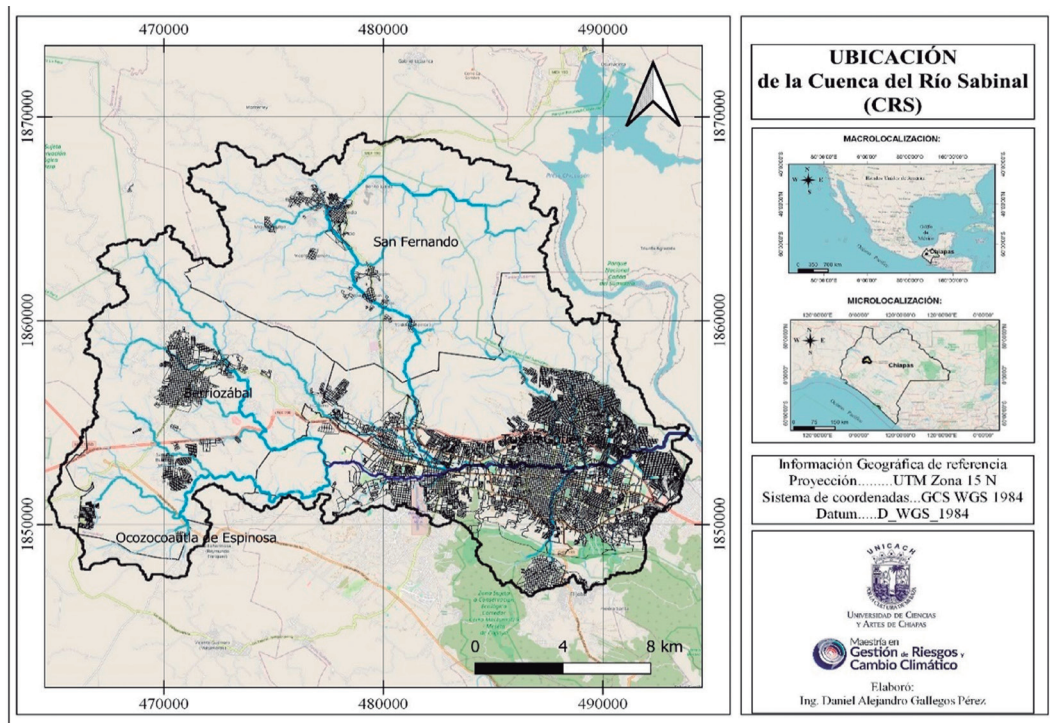
(SIATL-INEGI, 2023); geográficamente se ubica entre las coordenadas Latitud Norte (LN) 16°46'36.12"-16°44'34.68" y Longitud Oeste (LO) 93°3'19.84" 93°19'51.17". De acuerdo al SIATL-INEGI (2023), la cuenca es denominada Subcuenca Tuxtla Gutiérrez y tiene una superficie cercana a los 390.88 km<sup>2</sup>. El parteaguas de la cuenca abarca parte de los municipios de Tuxtla Gutiérrez, con una población de 604,147 habitantes, Berriozábal 64,632 y San Fernando 41,793 (INEGI, 2020). La topografía de la cuenca presentan altitudes que van desde los 400 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) a los 1,320 (INEGI, 2023b).

La CRS es de tipo exorreica y tiene como afluente principal al río Sabinal, el cual nace en el municipio de Berriozábal y desemboca en el río Grijalva. El río Sabinal, es alimentado por 22 arroyos: San Agustín, La Chacona, Chapultepec, Ojo de Agua, Pomarroza, Pistimbak, Potinaspak, Totoposte, Bambú, Blanco, Lomas del Oriente, Cerro Hueco, Santa Ana, Poc-Poc, San Roque, El Zope, San Pascualito, El Cocal; la lista incluye Romeo Rincón, San Francisco, Sabinal y La Laguna (Benítez *et al.*, 2022). En el territorio, existen seis unidades de suelo principales: Feozem, Luvisol, Regosol, Rendzina, Vertisol y Litosol (el más predominante) (INEGI, 2023b).

La vegetación más sobresaliente son el bosque tropical caducifolio y tropical subcaducifolio; con pequeños fragmentos de bosque de encino y de galería. Presenta dos tipos de clima: cálido subhúmedo con lluvias en verano – otoño e invierno [AwO (w) ig] y semicálido subhúmedo con lluvias en verano [Aw1 (w)(i')]; y con condición de canícula de medio verano. La temperatura media anual oscila entre 15 y 33 °C, mientras que la precipitación anual acumulada varía entre 800 y 1200 mm (Instituto Estatal del Agua, 2013). El periodo de lluvias abarca de mayo a octubre; y el mes más lluvioso es septiembre. La evaporación anual promedio es aproximadamente de 1,756.9 mm; presentando valores altos en abril (204,3 mm) y más bajos en diciembre (108,7 mm) (INESA-COLPOS, 2010).

### **Información digital y de campo**

En la aplicación de la metodología se emplearon 16 Modelos de Elevación Digital de Terreno (MDT) LiDAR (*Light Detection and Ranging*) con clave: e15c59d1, e15c59d2, e15c59d3, e15c59d4, e15c59e1, e15c59e2, e15c59e3, e15c59e4, e15c59f3, e15c59f4, e15c69a1, e15c69a2, e15c69b1, e15c69b2, e15c69c1 y e15c69; obtenidos del sitio web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023a) 2023a, con resolución espacial de cinco metros. También se utilizaron cuatro cartas topográficas digitales a escala 1:20,000 (clave: E15C59a, E15C59b, E15C59c y E15C59f) extraídas de INEGI (2023c).



**Figura 1.** Ubicación de la CRS. Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales del SIATL-INEGI (2023).

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizaron los programas de código abierto: Quantum GIS (QGIS 3.8.1) y el *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA versión 2.3.2) diseñados para el análisis y modelado científico (Conrad *et al.*, 2015). En la figura 2, se esquematiza la metodología general del trabajo realizado en esta investigación; mientras que en los siguientes apartados se explica con más detalle cada uno de los procesos efectuados.

### **Generación del Modelo de Elevación Digital del área de estudio**

Para la generación de un modelo de elevación del terreno en la zona de estudio fue desarrollado mediante la interpolación de los puntos extraídos de las curvas de nivel de las cartas topográficas en formato digital y los MDT LiDAR obtenidas del INEGI. El proceso de interpolación se realizó el programa QGIS mediante el modelo Kriging ordinario. Kriging proporciona una estimación de la ubicación no observada de la variable *z* basada en un promedio ponderado de puntos de observación vecinos dentro de un área determinada.

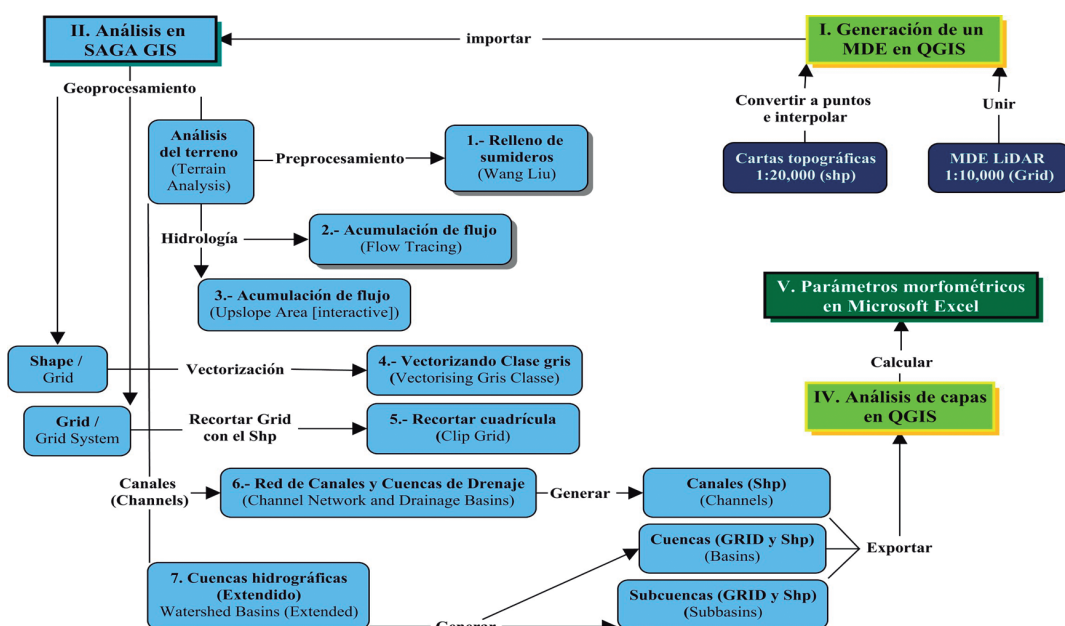


Figura 2. Metodología general de trabajo. Fuente: Elaboración propia

El concepto sobre la teoría de variables regionalizadas y puede describirse de forma general considera una función aleatoria intrínseca representada por  $z(S_i)$ , donde  $S_i$  plasma todas las ubicaciones de la muestra,  $i = 1, 2, \dots, n$ . La estimación promedio ponderada dada por el predictor Kriging ordinario en el punto no muestreado se define en la ecuación 1 (Setianto & Triandini, 2015):

$$z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \tag{1}$$

donde,  $\lambda_i$  son los pesos asignados a cada una de las muestras observadas. Estos pesos suman la unidad para que el predictor proporcione una estimación insesgada (ecuación 2):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \tag{2}$$

Los pesos se calculan a partir de la ecuación matricial (ecuación 3):

$$C = A^{-1} \times b \tag{3}$$

donde:

C= Pesos resultantes

A= Una matriz de semivarianzas entre los puntos de datos.

b= Un vector de semivarianzas estimadas entre los puntos de datos y los puntos en los que se va a predecir la variable z.

### **Delimitación de la cuenca y los cauces**

El parteaguas de la cuenca se generó de forma automática en el entorno de SAGA SIG mediante la aplicación de seis geoprocesamientos: 1) Corrección de sumideros con el módulo acumulación de flujo-seguimiento de flujo (Flow Tracing) y el algoritmo enrutamiento cinemático (*Kinematic Routing Algorithm*); 2) Delimitación del área de interés mediante el método Determinístico; 3) Transformación del MDE resultante a formato vectorial; 4) Recorte del MDE resultante al área de interés; 5) Establecimiento de la red de canales del terreno y las cuencas de drenaje. La red de corrientes se generó mediante el método de Strahler (Strahler Orden) y 6) Limitación por subcuencas desde el módulo *Watershed Basins (Extended)*.

### **Caracterización morfométrica**

De acuerdo con Withanage *et al.* (2015) la morfometría es la medición y análisis matemático de la configuración de la superficie terrestre, de la forma y dimensión de su fisiografía. Derivado de la delimitación de la cuenca y su red de drenaje en SAGA SIG se obtuvieron de forma automática las siguientes características:

- *Área de la cuenca de drenaje (A)*. Definida como la superficie ( km<sup>2</sup>) encerrada por el parteaguas (Horton, 1945). Este parámetro ejerce una fuerte influencia en la capacidad de almacenamiento de la cuenca. De acuerdo a su tamaño la cuenca puede ser clasificada de diferentes maneras: cuencas menores a 25 km<sup>2</sup> se catalogan como cuencas muy pequeñas de 25 a 250 cuenca pequeña, desde 250 a 500 cuenca intermedia-pequeña, a partir 500 a 2,500 intermedia- grande, posterior a 2500 a 5000 cuenca grande y mayores a 5000 muy grande (Campos-Aranda, 1998).
- *Perímetro de la cuenca (P)*. Longitud (km) del parteaguas de la cuenca (Horton, 1945).
- *Orden de corrientes (U)*. Grado de bifurcación o ramificación dentro de una cuenca (Horton, 1945). Es un indicativo del número de corrientes dentro de la cuenca; a mayor número orden mayor velocidad de descarga presentará la cuenca. Horton y Strahler clasificaron jerárquicamente el orden de un tributario de una cuenca de drenaje.

Con las herramientas de medición de datos vectoriales y ráster del programa QGIS propuestas por Mahajan y Sivakumar, en 2018, se determinaron las subsecuentes características:

- *Longitud de la cuenca (L<sub>b</sub>)*. Longitud (km) máxima medida en línea recta paralelo al cauce principal entre la salida de la cuenca hasta el parteaguas.
- *Longitud del cauce principal (L<sub>s</sub>)*. Distancia (km) aguas arriba de la salida del cauce hasta su origen, siguiendo la corriente de mayor orden hasta dividirse en dos del mismo orden. Se obtiene eligiendo el canal con mayor área de captación; repitiendo, hasta llegar a una corriente de orden uno (Campos-Aranda, 1998).

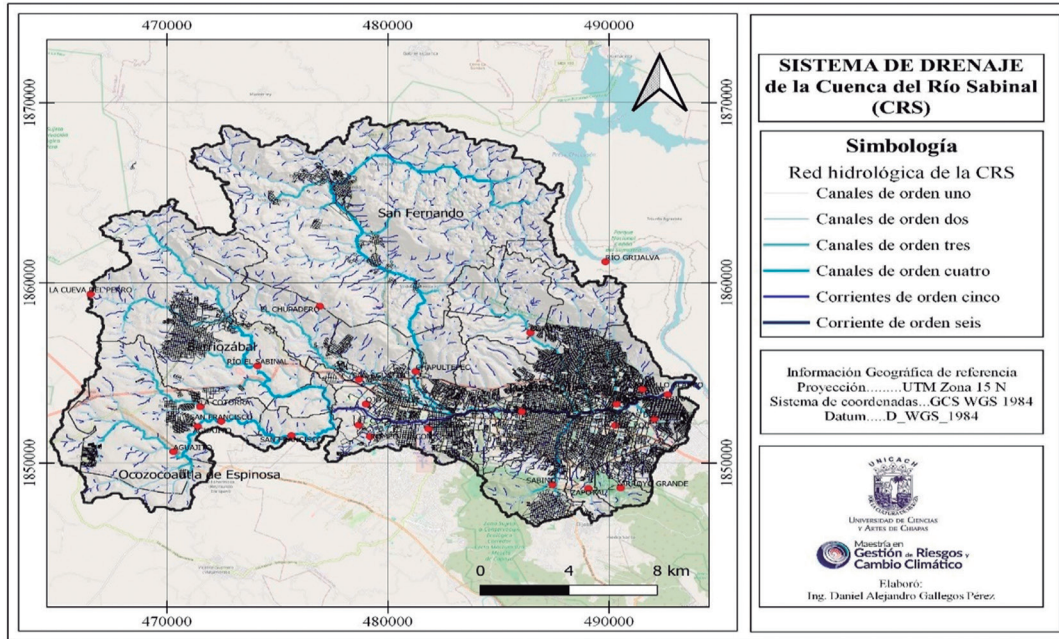
- Ancho máximo de la cuenca ( $A_s$ ). Distancia (km) horizontal de la dimensión más larga de la cuenca perpendicular a la línea de la corriente principal (Cruz Romero *et al.*, 2015).
- Pendiente de la cuenca ( $S_b$ ). Es un indicador que relaciona la altura de la cuenca por cada unidad recorrida sobre la horizontal. Su valor es adimensional; sin embargo, se expresa comúnmente en unidades de porcentaje.
- Elevación mínima ( $h$ ). Indica la altura mínima de la cuenca expresada en metros sobre nivel del mar (msnm).
- Elevación máxima ( $H$ ). Indica la altura máxima de la cuenca expresada en metros sobre nivel del mar (msnm).

## Resultados

Los valores obtenidos revelan que la CRS tiene un área de drenaje aproximada de 425,31 km<sup>2</sup>, se cataloga como cuenca intermedia-pequeña (Campos-Aranda, 1998); un perímetro ( $P$ ) de 182.60 km, una longitud ( $L_b$ ) de 27.83 km y una anchura máxima ( $A_s$ ) de 18.20 km. La escala utilizada define con mayor precisión las características del parteaguas de la cuenca y todo su sistema de drenaje, incluido corrientes efímeras no observadas a simple vista en imágenes de satélite (figura 3). Esto tiene importantes ventajas, especialmente en la precisión de la gestión y la planificación. Sin embargo, también presenta desafíos en términos de costos, tiempo y manejo de datos.

La cuenca presenta valores de  $R_e$  0.84,  $F_f$  0.55,  $R$  967.82 y  $S_b$  10.61, lo cual implica una forma alargada y ovalada, relieves y pendientes pronunciados moderadamente montañoso y gran rapidez de evacuación de sus aguas (Campos-Aranda, 1998; Pareta y Pareta, 2012).

La cuenca de forma alargada puede provocar un tiempo de concentración mayor, lo que significa que el agua de lluvia tarda más en desplazarse desde las partes más altas hasta la desembocadura, una forma elíptica podría concentrar el flujo hacia el centro, aumenta la susceptibilidad de riesgo a inundación en ciertas áreas externas. Las áreas con pendientes pronunciadas y montañosas tienden a tener un rápido escurrimiento superficial, lo que puede incrementar el riesgo de inundaciones repentinas en las zonas bajas, aumentan la erosión del suelo y la carga de sedimentos en los cursos de agua. Esto puede llevar a la colmatación de ríos y embalses, afectando la capacidad de almacenamiento y la calidad del agua. Además, pueden provocar deslizamientos de tierra y otros procesos de erosión que impactan negativamente en la estabilidad del terreno y la calidad del agua.

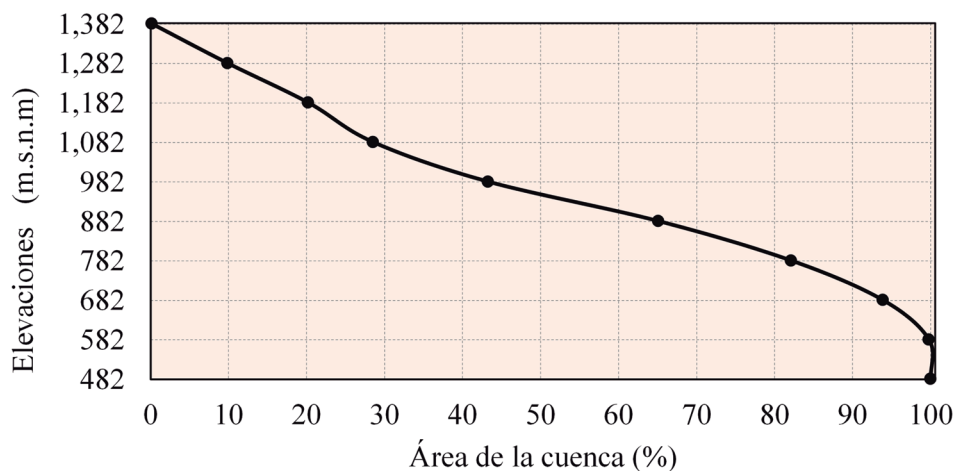


**Figura 3.** Sistema de drenaje de la CHRS. Fuente: Elaboración propia

La forma de la curva hipsométrica de la CRS sugiere que la cuenca se encuentra en una etapa de equilibrio (ver figura 4). Una curva hipsométrica en etapa de equilibrio indica una cuenca hidrográfica donde los procesos de erosión y sedimentación están balanceados, lo que tiene múltiples implicaciones positivas para la gestión de la cuenca.

### **Características asociadas a la red de drenaje**

El sistema de drenaje de la CRS, muestra patrones dendríticos y radiales con textura de drenaje moderada, está conformado por un río extenso de sexto orden ( $u$ ) y una red de 1,529 canales, los cuales en su mayoría son corrientes efímeras. La longitud del cauce principal es de 45.68 km y su pendiente promedio es de 1.25 por ciento; señalando incrementos en la altura de 12.5 metros por cada kilómetro recorrido aguas arriba del cauce. La longitud total de corrientes es de 1,290.47 km, con una relación de bifurcación, el promedio es de 3.09 típico de un sistema de drenaje natural dentro de una roca homogénea (Singh *et al.*, 2021). La densidad de drenaje es de 0.74 km/km<sup>2</sup>, lo que quiere decir que, por cada kilómetro cuadrado de la cuenca, hay una longitud media de arroyos de 0.74 km. Las cuencas más alargadas (Re cercano a 0.51) tienen tiempos de concentración más largos y flujos más sostenidos, lo que puede reducir el riesgo de inundaciones repentinas, pero presenta otros desafíos en términos de manejo de sedimentos y recarga de acuíferos (ver figura 5).

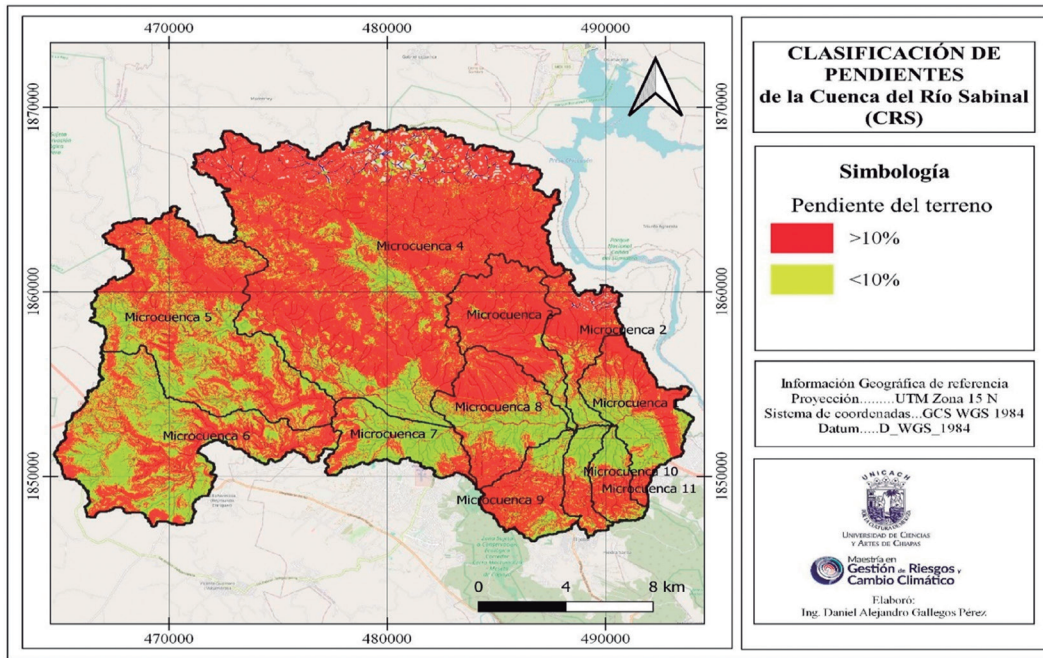


**Figura 4.** Curva hipsométrica de la CRS.

## Conclusiones

La determinación de parámetros morfométricos mediante un enfoque basado en SIG, permitió que el trabajo identificara aspectos de forma sobre el relieve y de drenaje en la CRS a partir del Modelo Digital LiDAR con resolución espacial 5 m. Contar con una delimitación más detallada proporciona datos más precisos para la toma de decisiones en gestión de cuencas, conservación del medio ambiente y desarrollo de proyectos de infraestructura, permite identificar y abordar problemas específicos de manera más eficaz, como erosión, sedimentación, contaminación de fuentes hídricas, y otros desafíos ambientales, facilita una planificación integral que considera todas las variables ambientales, sociales y económicas involucradas en la cuenca y permite una mejor asignación y uso de los recursos hídricos, lo cual es crucial en regiones con escasez de agua.

El desnivel y la pendiente media de la cuenca definido por un relieve con pendientes pronunciadas del terreno favorece la rapidez de la evacuación del sistema de drenaje, la erosión y la generación de sedimentos en la parte baja de la subcuenca. La relación de bifurcación media muestra una formación de la cuenca en terreno montañoso, con generación de erosión y velocidades altas de flujo de agua al interior de la zona continental. Por lo tanto, los valores de relación de relieve señalan actividad erosiva en algunas áreas de la cuenca, como laderas, así como la presencia de baja infiltración y alta escorrentía y la curva hipsométrica sugiere que la cuenca se encuentra en etapa de equilibrio.



**Figura 5.** Pendiente de la CRS. Fuente: Elaboración propia.

Este trabajo contribuye al conocimiento que se tiene de la cuenca de estudio y abona a la implementación de medidas que permitan una mejor gestión del riesgo ante eventos hidrometeorológicos potenciados por el cambio climático, como: construcción de terrazas, diques de contención y zanjas de infiltración para reducir la velocidad del agua y minimizar la erosión.

- Reforestación y plantación de coberturas vegetales para estabilizar el suelo y reducir la escorrentía superficial.
- Diseño de sistemas de drenaje eficientes para manejar el rápido escurrimiento y evitar inundaciones en áreas vulnerables. Identificación específica de áreas de alto riesgo de erosión e inundación para restringir el desarrollo y promover prácticas agrícolas sostenibles.
- Diseño y construcción de infraestructuras resistentes a desastres naturales, como puentes elevados y sistemas de alerta temprana para inundaciones. Implementación de proyectos de restauración de riberas para reducir la erosión y mejorar los hábitats acuáticos.
- Implementación de trampas de sedimentos y estructuras de retención para reducir la carga de sedimentos en los cuerpos de agua y programas de mantenimiento regular para infraestructuras hidráulicas y sistemas de drenaje para asegurar su eficiencia y durabilidad, entre otros.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAH-CYT) por el apoyo brindado para la realización de la presente investigación a través de la beca número 341863.



## Referencias

- Ameri, A. A., Pourghasemi, H. R., & Cerda, A. (2018). Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. *Science of The Total Environment*, 613–614, 1385–1400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.210>
- Caicedo-Toro, M. D., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., Intriago Zambrano, P. E., Caicedo Toro, M. D., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., & Intriago Zambrano, P. E. (2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8(SPE2). <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2605>
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8, 2271–2312. <https://doi.org/10.5194/gmdd-8-2271-2015>
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia*, 23 (64). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66784>
- Dimple, D., Rajput, J., Al-Ansari, N., Elbeltagi, A., Zerouali, B., & Santos, C. A. G. (2022). Determining the Hydrological Behaviour of Catchment Based on Quantitative Morphometric Analysis in the Hard Rock Area of Nand Samand Catchment, Rajasthan, India. *Hydrology*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/hydrology9020031>
- Guevara Gutiérrez, R. D. G., Olguín López, J. L. O., Mancilla Villa, Ó. R. M., & Barreto García, Ó. A. B. (2019). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, 24, Article 24. <https://doi.org/10.21138/GF.622>
- Hernández, G. T. (2022). Caracterización morfométrica de la cuenca del río Huitzilac, Puebla, México. *Boletín Geográfico*, 44(1), 41–48.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.o.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.o.CO;2)
- INESA-COLPOS. (2010). Plan de gestión y manejo integral de la cuenca del Río Sabinal (p. 120). Colegio de Postgraduados. [https://remexcu.org/documentos/conagua/bcc/pg/ctc/2011\\_PG\\_Sabinal.pdf](https://remexcu.org/documentos/conagua/bcc/pg/ctc/2011_PG_Sabinal.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de población y vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023a, agosto 23). *Topografía*. Geografía y Medio Ambiente; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/> Consultado el 25 de junio de 2023

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023b, agosto 23). *Biblioteca digital de Mapas*. Mapas; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=193&ag=20>
- Kumar, P., & Sarkar, P. (2022). A comparison of the AHP and TOPSIS multi-criteria decision-making tools for prioritizing sub-watersheds using morphometric parameters' analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 3973–3983. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01334-x>
- López Báez, W., Reynoso Santos, R., Castro Mendoza, I., Salinas Cruz, E., & Magdaleno Sánchez, R. (2016). Capacidad de infiltración de la cuenca del río Cuxtepeques, Chiapas, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(3), 103–112.
- López Huerta, C. A. L., Marceleño-Flores, S. M. L., Nájera-González, O., & Bojórquez-Serrano, J. I. (2022). La Morfometría como apoyo al estudio ante inundaciones en una cuenca del occidente de México. *EDUCATECONCIENCIA*, 30(34), Article 34. <https://doi.org/10.58299/edu.v30i34.485>
- López-Pérez, A., & Fernández-Reynoso, D. S. (2021). Watershed prioritization using morphometric analysis and vegetation index: A case study of Huehuetan river sub-basin, Mexico. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(18), 1852. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08212-x>
- López-Ramos, A., Medrano-Barboza, J. P., Martínez-Acosta, L., Acuña, G. J., Remolina López, J. F., & López-Lambraño, A. A. (2022). Assessment of Morphometric Parameters as the Basis for Hydrological Inferences in Water Resource Management: A Case Study from the Sinú River Basin in Colombia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijgi11090459>
- Mahajan, S., & Sivakumar, R. (2018). Evaluation of physical and morphometric parameters for water resource management in Gad Watershed, Western Ghats, India: An integrated geoinformatics approach. *Environmental Earth Sciences*, 77(15), 556. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7730-x>
- Nath, N. K., Agrawal, A., Gautam, V. K., Kumar, A., & Das, P. (2022). Morphometric evaluation of Ranikhola watershed in Sikkim, India using geospatial technique. *Environment Conservation Journal*, 23(3), 273–284. <https://doi.org/10.36953/ECJ.10672257>
- Pareta, K., & Pareta, U. (2012). Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of Ravi River Basin, H.P. India. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, 1, 47–62.
- SIATL-INEGI. (2023). SIATL v4 | *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)
- Withanage, N. S., Dayawansa, N. D. K., & De Silva, R. (2015). Morphometric analysis of the Gal Oya river basin using spatial data derived from GIS. *Tropical Agricultural Research*, 26(1), 175–180. <https://doi.org/10.4038/tar.v26i1.8082>

# Implicaciones de las inundaciones en la vulnerabilidad urbana de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Marcelino García-Benítez<sup>1\*</sup>, Omar Ávila-Flores<sup>2</sup>,  
Salvador Adame-Martínez<sup>3</sup>, José Francisco Pinto-Castillo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Cátedra IXM CONAHCYT. Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático.  
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

<sup>2</sup>Profesor Investigador. Coordinación Administración Municipal. Universidad de la Sierra Sur

<sup>3</sup>Profesor Investigador. Facultad de Planeación Urbana y Regional.  
Universidad Autónoma del Estado de México

<sup>4</sup>Técnico académico. Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático.  
Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

\*marcelino.garcia@unicach.mx

## Resumen

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se ubica dentro de dos sistemas montañosos, presenta una fuerte presión territorial por uso de suelo urbanizable que influye en la antropización de la cobertura del suelo y favorece la degradación del paisaje. Se han originado puntos de presión por la presencia de eventos extremos de lluvia durante el verano y parte del otoño, dentro de los 21 afluentes en la subcuenca hidrográfica del río Sabinal.

Para determinar el grado de vulnerabilidad urbano con enfoque de cambio climático, se realizaron indicadores cuantitativos y cualitativos que describen la susceptibilidad por exposición a inundación generados por la distribución de los eventos de lluvias extremas e identifican zonas de mayor probabilidad a inundarse a escala de Área Geoestadística Básicas urbana (AGEB). Se estableció una tipología en cinco grados de intensidad; Muy Alto (MA) donde se presentó el mayor número de AGEB, grado Medio (M) conforme avanza el cauce hacia la parte baja de la cuenca, el grado Bajo (B) a inundaciones donde existen puntos de recurrencia y se establecieron 2 grados intermedios en los extremos de la tipología.

La confluencia de la población en ambos lados de los afluentes en los AGEB de la región Oriente como Poniente, origina un problema de susceptibilidad debido a la trayectoria del cauce que desemboca hacia el río Sabinal. De los 214 AGEB en la ciudad, 90 presentaron una vulnerabilidad Muy Alta (MA), en nivel Alto (A) de vulnerabilidad se presentaron 5 AGEB, en nivel Medio se encontraron 54 AGEB y en nivel de vulnerabilidad Muy Bajo se fueron 65 AGEB.

**Palabras claves:** Puntos de presión a inundación, vulnerabilidad urbana, AGEB urbano y ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

## Introducción

En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas que presenta una serie de contrastes físico- geográfico y socioambientales que influyen en un terreno accidentado que se ve reflejado en un crecimiento desordenado. Las inundaciones son una amenaza latente, esta aumenta debido a la presencia de eventos de lluvia intensas o extremas y por las condiciones de la morfología física determinada por la reorganización espacial de la ciudad anualmente. Aunque no sean realizado estudios académicos y científicos con respecto identificar puntos inundables hacia el interior del área urbana en la cuenca del río Sabinal (SOP y SPC, 2015).

Actualmente existen planes de ordenamiento territorial, los cuales se diseñaron con el fin de atender el crecimiento poblacional del área urbana y prevenir los constantes daños producidos por fenómenos hidrometeorológicos como inundaciones que están presentes durante la temporada de verano. El estudio del riesgo y vulnerabilidad aporta información espacial sobre zonas con mayor susceptibilidad o exposición a que se presenten eventos que originen desastres en la población urbana. La realización del estudio ha tenido como objetivo estudiar la relación de los factores ambientales, sociales, económicos que se encuentran vinculados mediante indicadores, donde se define las condiciones geográficas de la ciudad a escala interurbana como son los AGEB.

Adger, 1999; Vásquez, Espíritu, Morales y otros, (2009); señalan la importancia de la gestión ambiental como parte de la acción coordinada interinstitucional a nivel federal, estatal y municipal, para atender los problemas originados por la presencia de las lluvias intensas en las ciudades expuestas. Resaltan la importancia de la generación de investigaciones y sus resultados publicados, para explicar la importancia de la información geográfica en los estudios de la vulnerabilidad interna de las áreas urbanas ante el aumento de eventos de lluvia extrema que se originan por fenómenos regionales.

Las inundaciones en zonas urbanas de la República Mexicana sean desarrolladas metodologías para la generación de mapas de riesgo y vulnerabilidad con el propósito de prevenir riesgos asociados por inundación a la infraestructura local, donde se subdivide la cuenca hidrológica y superponer la división con los centros de población, priorizar zonas de inundación para la valoración de daños generados por inundaciones con el fin de mitigar la pérdida de recursos económicos de la sociedad (Alcocer, Rodríguez, Bourguett y otros, 2016).

Se consideran simulaciones bidimensionales para la generación de mapa de inundación, estas son una herramienta para la toma de decisiones en el control de inundaciones dentro de las zonas urbanas, se describen los criterios utilizados para la definición de áreas de inundación: tirante, velocidad e intensidad de sumersión y aplicar la metodología desarrollada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez para mostrar los alcances y beneficios de la misma (CONACYT, CONAGUA, IMTA, 2011).

Ante las necesidades que se generan posterior a un evento de inundación, son los individuos, las familias y la sociedad en general quienes afrontan estas situaciones de crisis con sus propios recursos, los daños ocasionados en sus bienes en áreas de crecimiento de comunidades rurales que se integran a la mancha urbana. Derivado de este proceso se generan desigualdades entre la población, en parte derivado por la falta del acrecentamiento de los servicios públicos, acceso al mercado de viviendas accesibles y las carencias que originan este proceso desarrollo en las localidades.

Naciones Unidas, propone disminuir los problemas sociales mediante iniciativas internacionales que comprometen a los gobiernos federales a reducir las carencias, la pobreza y la inclusión de todos los sectores vulnerables mediante la instauración e implementación de una Agenda 2030 para la inducción hacia una visión que permita el Desarrollo Sostenible (ONU, 2020).

La propuesta incluye 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), para este trabajo se destaca el objetivo 11: ciudades y comunidades sostenibles, en el cual se establece incluir el hacer frente al cambio climático sin que nadie quede atrás para el 2030. Aunque existen 169 metas específicas que los países incluido México, deberá de atender para reducir en la medida de las capacidades sociales, ambientales y de gestión de políticas públicas, previéndose los efectos en los distintos sectores regionales en los que se encuentra articulado el territorio (ONU, 2020).

## **Inundaciones**

De acuerdo con el glosario internacional de hidrología desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la educación, Ciencia y la Cultura (UNESCO), (2012), las inundaciones pueden definirse como el aumento de agua por arriba del nivel normal del cauce. En estos casos el nivel normal se debe entender como aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, inundación es una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que pueden generar pérdidas. Estos incrementos y disminuciones, representan el comportamiento del escurrimiento en un río.

Una inundación “es un evento que debido a la precipitación (lluvia, nieve o granizo extremo), oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar, genera invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y daños en la población e infraestructura de las ciudades” (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2012:2).

Las inundaciones son originadas cuando un caudal de agua temporal se desborda fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas); se presentan debido a que los cauces de escorrentía superan la capacidad de la infraestructura, a la falta de retención por la vegetación natural, deficiencias en la infiltración hacia el subsuelo y/o la capacidad de transporte de los canales, son eventos propios y periódicos de la dinámica natural de las cuencas hidrográficas (IDEAM, 2014).

La clasificación más común, obedece a su origen y al tiempo que tardan en presentarse sus efectos, para identificar las características de las inundaciones señalaremos la tipología propuesta por el Centro Nacional de Prevención de Desastres en 2012:

Tipos de Inundaciones pluviales:

- Por Ciclones tropicales.
- Por Lluvias orográficas.
- Por Lluvias invernales.
- Por Lluvias convectivas:

## Vulnerabilidad por exposición con enfoque de cambio climático

A lo largo de 6 décadas el estudio sobre los riesgos y la vulnerabilidad se ha estudiado por distintas disciplinas y por separado, aunque cada área del conocimiento pretender abordar fines específicos como si no existiera una relación entre ellos, la vulnerabilidad puede entenderse como la suma de los factores, que, correlacionados y subyacentes a la exposición a los eventos físicos potencialmente peligrosos, hacen que un elemento material como las personas, infraestructura, ambiente y medios de vida sea propenso a daño o pérdida (Díaz, 2018).

Es el resultado de las condiciones sociales, políticas y económicas que asignan diferentes números de debilidad o falta de resistencia a determinados grupos sociales (Narváez, Lavell y Ortega, 2009). Este enfoque identifica una serie de circunstancias como causas de la vulnerabilidad como son:

- Los grados de resistencia de personas, infraestructura, ambiente y medios de vida.
- Los grados de resiliencia de las personas, infraestructura, ambiente y medios de vida.
- Las condiciones socio económicas y de bienestar de vida.
- Los grados de protección social y autoprotección individual.
- El nivel de gobernabilidad de la sociedad.

El análisis de la construcción de la vulnerabilidad se hace en dos momentos distintos del proceso. Por un lado, en las condiciones en que la unidad de análisis tiene antes de una *situación de estrés*, que le hacen más o menos propensa a una pérdida específica. Por otro lado, están las formas que se desarrolla la unidad de análisis para enfrentar una *condición de estrés* una vez que esta ha ocurrido y que se relacionan con la capacidad de ajuste (Cajigal y Maldonado, 2019).

La vulnerabilidad al cambio climático se basa en la relación de los sistemas físicos con los ambientales que influyen en el problema de desarrollo (Lampis, 2013). Este enfoque describe una forma más analítica del concepto vulnerabilidad, incorpora más elementos como el territorio y el clima. El impacto de las amenazas en tiempo real permite generar acciones de alertamiento sobre los efectos en el territorio y la posibilidad de daños a futuro. Los efectos producto de las actividades humanas propician estrés en el ambiente, por lo que las amenazas o peligros son más constantes y de mayor intensidad en la actualidad (Sánchez y Bonilla, 2007).

Los estudios de vulnerabilidad por exposición, incluye a los grupos o individuos que presentan estrés como resultado de los impactos del cambio, variabilidad y extremos climáticos. Engloba la interrupción de los grupos o individuos, medios de vida y la adaptación forzada a los cambios en el entorno físico. Para los investigadores sociales consideran a la vulnerabilidad a cambio climático como la incapacidad de las personas para hacer frente a los peligros, aunado a factores socioeconómicos asociados con el clima consideran al tiempo, las perturbaciones climáticas, la probabilidad de la ocurrencia y relacionado con los eventos extremos para describir la vulnerabilidad (Adger, 1999).

Los estudios consultados para detallar este enfoque de vulnerabilidad ante el cambio climático hacen referencia a los informes presentados por organismos internacionales como el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, que describen en sus reportes el estado de la vulnerabilidad en el planeta, la importancia de profundizar en estudios espaciales, regionales y su intervención

local. Existen etapas que han permitido disminuir la susceptibilidad de la población en la atención de desastres por eventos climáticos extremos estas son: prevención, adaptación y mitigación (IPCC, 2001 y 2007).

La importancia de contrastar los aspectos analizados en ambos enfoques, riesgo (biofísico) y cambio climático (socioambiental), implica que sea este último es que más recientemente se trabaja por las condiciones climáticas cambiantes, al ser los fenómenos ciclónicos eventos que se presentan anualmente en las zonas costeras, la identificación de zonas vulnerables y sectores sociodemográficos determinan la situación de afectación que puede presentarse en el futuro (Chávez, Binnqüist y Flores, 2017).

La vulnerabilidad por cambio climático puede definirse en tres puntos:

1. Evalúa la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.
2. Conocimiento de probabilidad de nuevos eventos e intensidades hacia futuro.
3. Genera modelos o escenarios climáticos a futuro.

Para la realización de este trabajo, se tomaron en cuenta fenómenos hidrometeorológicos que han afectado la cuenca hidrológica durante los últimos 20 años, se hace mención de los fenómenos de mayor relevancia.

- De acuerdo con lo documentado el día jueves 31 de mayo del 2001, “fuertes lluvias provocaron el desbordamiento de varios de los afluentes del Río Sabinal, afectando a las Colonias Los Pájaros, Bienestar Social, Terán y Potinaspak” (CONAGUA, 2010:7). Las lluvias del mes de mayo provocaron además el derrumbe de una barda del penal de Cerro hueco, afectaciones a 150 viviendas de 20 colonias; situación que se generó principalmente, por la falta de capacidad de los cauces de los arroyos tributarios del Río Sabinal y por el cambio de uso del suelo; ocasionando que el tiempo de concentración sea inferior o igual al tiempo de duración de la precipitación (CONAGUA, 2010).
- El 6 de octubre del 2003 la Tormenta Tropical Larry causó lluvias intensas, en especial en la parte alta de la cuenca del río Sabinal de 225 mm generó una avenida con un gasto máximo estimado de 300 m<sup>3</sup>/s, ocasionó el desbordamiento del río afectando a una superficie de 290 ha (Secretaría de Protección Civil Municipal, 2015) y (Silva, Hernando, García y Otros; 2020).
- Los caudales desbordados provocaron serias afectaciones en decenas de colonias de Tuxtla Gutiérrez, con afectación a 28 colonias importantes, 39,000 habitantes y 49,720 viviendas. La existencia de azolve, basura y vegetación en los cauces; estructuras de cruce (puentes), bóvedas y obras de captación pluvial, hacen que disminuya el área hidráulica del cauce principal y sus afluentes; así como la insuficiencia en dimensiones de la sección transversal en algunos puntos del cauce principal y sus afluentes (UNACH y CONAGUA, 2013).
- El 17 de agosto de 2010 se presentó la Onda Tropical número 23 en la que hubo pérdidas económicas cuantiosas y severos daños a la infraestructura de la ciudad, así como daños a cientos de viviendas, debido a que se tuvo una precipitación de 72.2 mm en una zona sensible (desde el punto de vista hidrológico). Los escurrimientos provocados por estas lluvias inundaron decenas de colonias de la ciudad, provocando

pérdidas materiales cuantiosas y de forma sorpresiva e inédita se inundó una de las plazas comerciales más importantes de la ciudad (Mundo, 2014).

- Lluvias de 114 mm dejó un saldo de 6 ríos desbordados y afectaciones en las colonias y fraccionamientos: La ilusión, Albania baja, paso limón, Patria Nueva, Santa Cruz, Linda Vista, Shanka y los barrios San Francisco y Colón, las aguas colapsaron un puente y arrastraron una vivienda. (Romero, 2016).

## Metodología

Para el cálculo del índice de vulnerabilidad con enfoque de cambio climático, se basa totalmente en la exposición a inundaciones, es un proceso metodológico que consta de una dimensión y de seis variables, además de un asunto producido por la combinación de múltiples dimensiones de desventaja en el que toda esperanza de movilidad ascendente de superación de su condición social de exclusión, es contemplada como extremadamente difícil de alcanzar (Parroquin, Uehara y Sánchez, 2018) y (Rodríguez, 2019).

El concepto de vulnerabilidad hace referencia de dos cuestiones:

- Al incremento de las amenazas que afectan a las personas y distintos grupos socioeconómicos.
- Al debilitamiento de los mecanismos para afrontar dichas amenazas.

Es importante seleccionar una cantidad pequeña de indicadores en la que se refleje la historia, el desarrollo y las proyecciones del fenómeno a analizar en la vulnerabilidad de una ciudad (Argüello *et al.*, 2020). Entre mayor número de indicadores se escoja, mayor la incertidumbre, por lo que se puede priorizar al momento de ponderar las variables.

La selección de indicadores sea enfocada totalmente a la dimensión ambiental, que refleja el impacto inducido de los eventos extremos de la zona de estudio. Están asociados con las variables biofísicas determinadas por la causalidad de los eventos extremos de precipitación a nivel regional y local que inciden por la probabilidad de trayectorias de ciclón tropical en cercanía a la zona de estudio.

I1. Ciclones Tropicales: Se considera el número de eventos ciclónicos que presentaron una trayectoria de 0 a 10 km en la zona de estudios entre los eventos ocurridos en una circunferencia de 0 a 100 km.

$$\frac{\text{Eventos ciclónicos con trayectoria de 0 a 10 km de la zona de estudio}}{\text{Eventos ciclónicos con trayectoria de 0 a 100 km de la zona de estudio}}$$

En este indicador se manifiesta la probabilidad de que un ciclón tropical presente una trayectoria de 0 a 10 km y de 0 a 100 km de cercanía con la zona de estudio, es importante conocer la distancia debido a que este tipo de fenómenos por su estructura física, la cual se presenta en tres momentos específicos:

- Antes, es la llegada de las primeras bandas de nubosidad y viento previo al impacto del fenómeno e un lugar específico.



- Durante, es el lapso de calma en la cual atraviesa el ojo del huracán por la zona de impacto.
- Posterior, cuando las bandas de nubosidad cruzan en su totalidad y se alejan de la zona impactada.

12. Probabilidad de eventos máximos en temporada de lluvias: Para el cálculo de este indicador se consideran el total de eventos extremos totales en el año dividido en los eventos extremos que ocurren en periodo de lluvias.

$$= \frac{\text{Eventos extremos totales en el año}}{\text{Eventos extremos que ocurren en temporada de lluvias}}$$

Este indicador muestra la relación de eventos extremos ocurridos durante el año entre los que ocurren en el periodo de lluvias, esto para conocer qué tan variables son los eventos extremos en cada una de las estaciones de registro.

13. Precipitación extrema por periodo anual: Se consideran el total de eventos máximos registrados en la estación entre el número de años de registro con el que cuentan con el que cuentan las estaciones meteorológicas.

$$\frac{\text{Total de eventos extremos registrados en la estación}}{\text{Nº de años de registro en la estación}}$$

La definición de lluvias intensas o extremas se refiere a la caída de agua mayor a 60 mm en el transcurso de una hora (Dirección General de Prevención Civil y Emergencias, 2020). Conociendo el número de eventos extremos que se presentan en un espacio o territorio determinado es estudiado mediante estaciones hidrometeorológicas durante un tiempo específico de registro. Se obtiene el número de eventos promedios que se presentan por año en la zona de estudio.

14. Precipitación promedio en periodo de lluvias: Precipitación total caída en periodo de lluvias dividido entre el número de días con precipitación.

$$\frac{\text{Precipitación en periodo de lluvias}}{\text{Nº de días con precipitación}}$$

El resultado obtenido de este indicador contribuye al estudio del comportamiento de la lluvia total captada en el periodo de lluvias, si esta fuera uniforme en los días que se capta precipitación se pueden conocer las variaciones de la cantidad de lluvias en cada una de las estaciones que se utilizaron para el estudio.

15. Precipitación extrema diaria: Precipitación máxima en el mes dividido entre Precipitación total mensual multiplicado por 100, esto debido a que el valor obtenido en este indicador, será de manera porcentual.

$$\left( \frac{\text{Precipitación máxima mensual}}{\text{Precipitación Total mensual}} \right) * 100$$

Los eventos máximos presentados en la ciudad no siempre superan los 60 mm. Sin embargo, estas lluvias también son importantes debido a que estas colaboran con la saturación de los mantos freáticos que provocan que cuando una lluvia extrema se presenta la filtración de esta ya no se permite.

Por eso es relevante tomar en cuenta los eventos máximos presentados en el mes durante la temporada de lluvias, como el nombre del indicador, la selección de datos solo se lleva a cabo durante la temporada de lluvias que para la zona de estudio regularmente inicia a finales de mayo y termina en octubre.

Para el cálculo se tomará la precipitación máxima durante el mes para después dividirlo entre la cantidad de lluvia total de los días durante el mes, esto con la intención de obtener el porcentaje de precipitación al evento extremo con respecto al total durante el mes de registro.

16. Precipitación promedio anual: Cantidad de precipitación en periodo de lluvias dividido entre el número de años de registro en la estación.

**Precipitación captada en periodo de lluvias**  
**Cantidad de años de registro en la estación**

Este indicador necesita obtener la suma total de la precipitación registrada durante el periodo de lluvias en cada una de las estaciones de registro, una vez obtenido este dato dividirlo entre los años de registro de datos con la que cuente cada una de las estaciones, esto con la intención de obtener un promedio de precipitación anual de lluvia y poder realizar un análisis de la variabilidad de en el volumen de lluvia en cada una de ellas.

Estos indicadores fueron retomados con base en estudios donde se hicieron un análisis de las condiciones climáticas actuales, sin olvidar que estas son consecuencia de los procesos climáticos pasados, aunque estos han evolucionado debido a los cambios en el territorio por la intervención de las actividades humanas a nivel regional (Monterroso-Rivas, 2012 y García, 2018).

La evaluación de los factores biofísicos se enfoca en los impactos inducidos por los eventos extremos y cambios futuros sobre variables climáticas. Se determina el potencial con el que se presentan los eventos extremos en la zona de estudio, por lo cual se apoya de las estaciones meteorológicas fueron seleccionadas de acuerdo a la cercanía que tuvieran estas con la ciudad, una vez seleccionadas se hizo una depuración de los datos para que nos quedaran únicamente los que se consideran útiles para el cálculo de las variables, en este caso las variables únicamente requieren de los datos de lluvia.

Para el cálculo de la precipitación media de la cuenca se aplicó el proceso de polígonos de Thiessen para ver el área de influencia de cada una de las estaciones, con esto pudimos dividir a la ciudad en Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) en los que tenía influencia cada estación.

Método de los polígonos de Thiessen. Este proceso requiere el conocimiento de la ubicación de cada estación dentro del área o en la periferia de la cuenca para proceder a su aplicación, se identifica la zona de influencia de cada pluviómetro y/o pluviógrafo (Pizarro, Ramírez y Flores, 2003). Así se van formando triángulos entre las estaciones más cercanas uniéndolas con segmentos rectos sin que éstos se corten entre sí y que formen figuras lo más equiláteras posibles. A

partir de allí se trazan líneas bisectores perpendiculares a todos los lados, las que al unirse en un punto común dentro de cada triángulo conforma una serie de polígonos que delimitan el área de influencia de cada estación.

Pizarro, Ramírez y Flores (2003), generaron un análisis de 5 procesos en el cual se describieron las ventajas y desventajas sobre el área de influencia que ha permitido mejorar las estimaciones en el área de influencia de una estación meteorológica comprendida dentro de un área donde está ubicada la cuenca. Para determinar la precipitación media distribuida en una cuenta, se aplica la siguiente propuesta metodológica:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i * A_i)}{A} = \sum_{i=1}^n (P_i * \frac{A_i}{A})$$

Siendo:

$\bar{P}$  Precipitación media registrada en las estaciones meteorológicas en la cuenca.

$P_i$  Precipitación observada y registrada por estación  $i$ .

$A_i$  Área de influencia de la estación  $i$ .

$A$  Superficie total de la cuenca.

$n$  Número de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas con datos registrados en la cuenca.

El cambio climático conlleva a presentar amenazas o peligros con mayor intensidad derivados en la estabilidad ecológica local, cualquier perturbación influye en el resto de las comunidades, induciendo etapas de estrés, las cuales se pueden presentar a corto o mediano plazo.

Para construir el índice de vulnerabilidad por exposición a inundación, se obtuvieron datos climatológicos de la ciudad para calcular los indicadores de vulnerabilidad, se realizó la revisión de las estaciones meteorológicas cercanas a la ciudad, se realizó la depuración en la base de datos para determinar el área de influencia en la zona de estudios. Entre mayor distancia exista entre el rango de varianza en los datos de precipitación, mayor probabilidad de alterarse los resultados, por lo tanto, el último filtro para determinar la utilidad de las estaciones, fue el tiempo de registro de datos en las frecuencias cercas a la ciudad. Este mecanismo de depuración ha sido consultado en literatura donde se recomienda para construir indicadores de manera correcta, se debía contar por lo menos con 30 años de datos registrados en las estaciones seleccionadas (Cajigal y Maldonado, 2019).

En la tabla 1, se hace referencia a las estaciones seleccionadas para determinar el proceso de distribución de la precipitación en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas cercas a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Número	Nombre	Altitud (msnm)	Periodo de Registro
1	El Boquerón	500	1951-2017
2	Puente Colgante	418	1951-2017
3	Tuxtla Gutiérrez OBS	570	1942-2010

Número	Nombre	Altitud (msnm)	Periodo de Registro
4	Tuxtla Gutiérrez CFE	532	1970-2017
5	Tuxtla Gutiérrez DGE	543	1951-2016
6	El Sabinal	498	1987-2018
7	Berriozábal	890	1988-2018

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2020.

De la aplicación “Busca Ciclones”, se obtuvieron datos con información geográfica como el lugar de origen, la fecha, el nombre de los fenómenos hidrometeorológicos que han presentado una trayectoria cercana a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en formato para trabajar con ello en un sistema compatible para la obtención del indicador de Ciclones a 10 km de la ciudad (CENA-PRED y SINAPROC, 2017).

### Cálculo del Índice de Vulnerabilidad por Exposición a Inundación (IVEI)

La construcción de metodologías para los estudios de riesgo y vulnerabilidad, se han diversificado a medida que los enfoques se han actualizado en las problemáticas cada vez más complejas como es el cambio climático, representa un problema multidimensional que se deriva a falta de sustentabilidad ambiental (Bhattacharai y Conway, 2010).

Para las evaluaciones de vulnerabilidad a cambio climático, se basan en un estudio previo de las condiciones ambientales como son la temperatura, inundaciones, cambio de uso del suelo y deterioro de vegetación (Meyer, 1999; Landa y otros, 2008; Isabele y otros, 2009 y Jabarren, 2012).

Para la construcción y el procesamiento de indicadores que fueron construidos a través de los datos, es explicado a continuación:

- La escala de Saaty es una herramienta propuesta para establecer la importancia o preferencia de criterios o alternativas en la matriz de comparaciones a pares. Es una escala de prioridades como forma de independizarse de las diferentes escalas que existen; de esta forma, se entrega homogeneidad y cierto grado de certeza a las comparaciones (Saaty, 1988). Es una técnica multidisciplinar en la cual se unifican criterios de fuentes distintas que permiten delinear el impacto de los factores, aunque las variables no se encuentren en las mismas unidades métricas. Para aplicar este proceso se aplica la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\pi - \mu}{\sigma}$$

Donde:

Z= Dato estandarizado o normalizado.

$\pi$ = Valor nominal del dato a estandarizar.

$\mu$ = Media aritmética.

$\sigma$ = Desviación estándar.

1. Jerarquización o ponderación. Se descompone las estructuras complejas en componentes, se ordenan las variables en una estructura jerárquica y se obtienen los valores numéricos para generar juicios de preferencia. Cadena y Campos, (2012) y Ávila, (2016); han sintetizado las variables para determinar el orden de prioridad. Para llevar a cabo este proceso se aplica la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{N} + E1/N$$

Donde:

1= Valor ponderador

N=Numero de Jerarquización según indicador

E1= Indicador a ponderar.

Los principios fundamentales de este proceso son:

- Construcción de jerarquías: Los sistemas complejos pueden ser mejor comprendidos mediante su descomposición, la estructuración de dichos elementos jerárquicamente, y la composición de los juicios, de acuerdo con la importancia relativa de los elementos de cada nivel de jerarquía. La jerarquización representa la descomposición del problema en las partes que lo componen.
- Establecimiento de prioridades: Los seres humanos perciben relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares entre ellos con respecto a un criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro.
- La escala Saaty es una herramienta propuesta para establecer la importancia o preferencia de criterios o alternativas en la matriz de comparaciones a pares. Es una escala de prioridades como forma de independizarse de las diferentes escalas que existen.
- Consistencia lógica: Se debe realizar un ordenamiento jerárquico para los elementos.

Para el cálculo final se aplicaron las fórmulas descritas anteriormente y la ecuación para la obtención de los subíndices de indicadores a nivel de AGEBS urbanos cuando se trató de la parte de la vulnerabilidad.

El proceso se realizó de la siguiente manera:

$$IVEI = \frac{I1 + I2 + I3 + I4 + I5 + I6}{6}$$

2. Método de Semaforización. Es aplicado para cada dimensión, se debe desglosar en pilares, temas, subtemas e indicadores, respectivamente. El ejercicio de semáforos involucra dos de estos elementos: los indicadores (con sus valores de referencia) y los temas.

El proceso de semaforización inicia con la asignación de un color de semáforo para cada indicador. Esto se realiza a partir de los datos obtenidos de los indicadores y los rangos de los valores

de referencia establecidos para cada uno de ellos. Los valores de referencia se agrupan en tres rangos, a los cuales se le asigna un color de acuerdo con los siguientes criterios:

- Verde: Cuando el indicador está dentro de los parámetros indicados.
- Amarillo: Si el indicador presenta rezagos.
- Rojo: Si el indicador señala una situación crítica.

Ubicar el valor estimado para cada indicador dentro de estos rangos, permite obtener un color de semáforo (verde, amarillo o rojo) para los indicadores, aparte de los tres colores sugeridos se puede integrar colores de transición para ser más específico o tener límites más cortos entre indicadores. Dado que un tema está compuesto por varios indicadores, la evaluación final del color a asignar a cada tema surge de analizar los semáforos obtenidos para todos los indicadores incluidos en el mismo tema. Los valores de referencia están relacionados con estudios o aportes de especialistas que induce a la comparación con análisis de datos recabados en relación con las ciudades elegibles para hacer Indicadores de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) (BID, 2010).

## Resultados

La exposición por inundaciones está compuesta por las condiciones ambientales del entorno en el cual se presenta los fenómenos, así como los factores geográficos como la topografía, tipo de vegetación natural, condiciones de recubrimiento de la superficie del suelo y el sistema de afluentes dentro de la cuenca hidrológica principal, que actúan para que las lluvias afecten de manera consecuente a la población que vive en los cauces tanto del río Sabinal como de los afluentes de este.

Las inundaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; se presentan como un fenómeno de origen natural con mayor frecuencia, a pesar de que no ser lluvias extraordinarias están causando diversos inconvenientes en la ciudad, se identificaron las zonas más expuestas a presentar eventos de inundación.

Para entender la distribución espacial de las inundaciones se zonificó a la ciudad por AGEB de la siguiente manera: zona Centro con 25, zona norte 47, zona sur 31, zona poniente 54, zona oriente 54 (ver tabla 2). Cabe recalcar, que dicha división fue totalmente basada en la ubicación geográfica de los AGEB y su relación histórica del proceso de urbanización hasta la última década (ver figura 1).

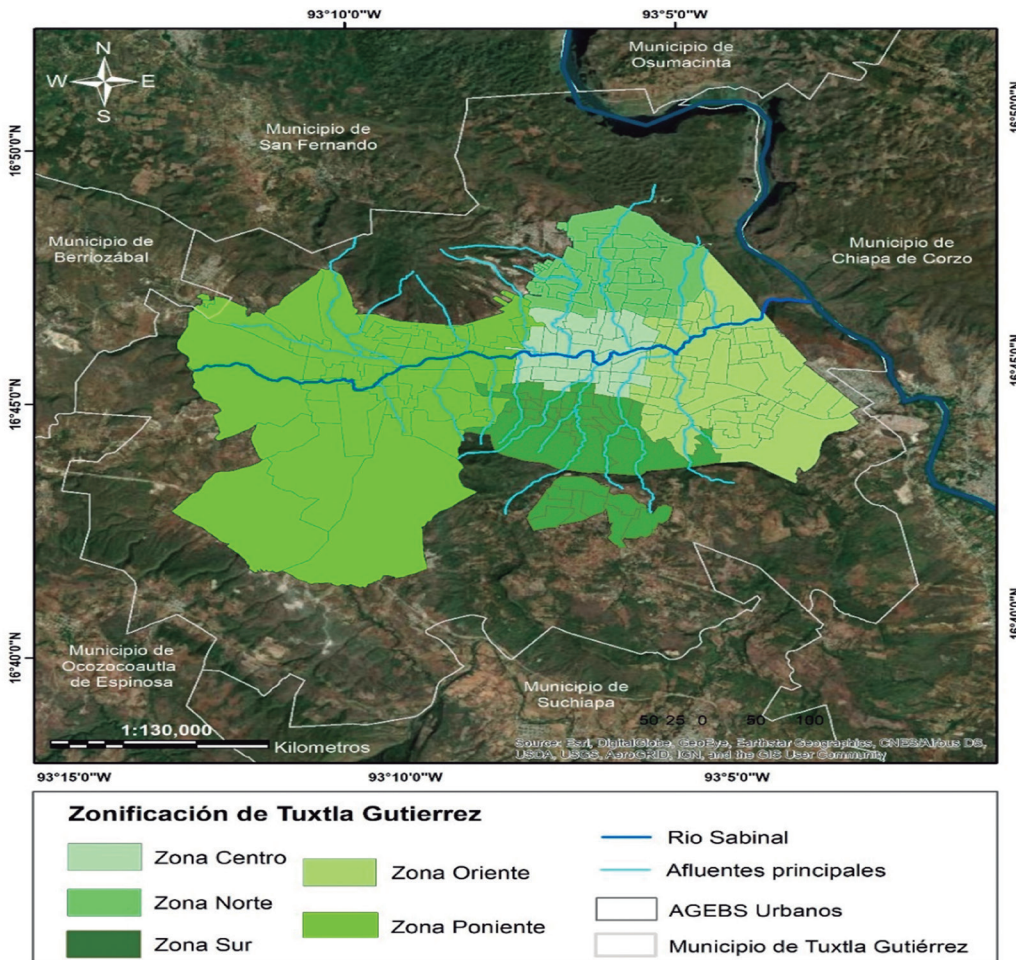
**Tabla 2.** Zonificación de los AGEB en la ciudad Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Zona	Total AGEB	Superficie (km <sup>2</sup> )
Norte	47	13.94
Sur	31	26.91
Centro	25	9.61
Poniente	54	71.17
Oriente	57	18.44

Fuente: Elaboración propia.

Distribución territorial de las inundaciones según el grado de exposición por AGEB se presenta así:

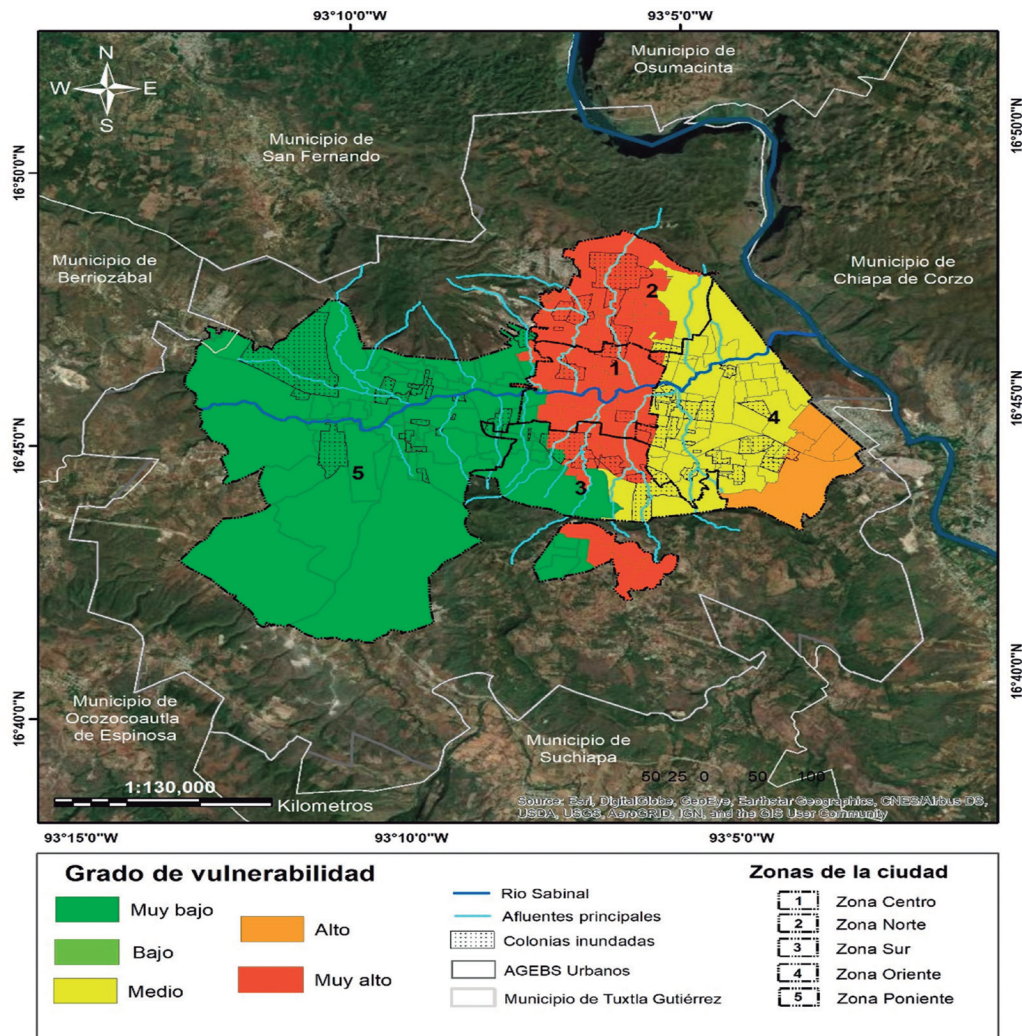
- Zona Norte: En esta área presentan un grado de vulnerabilidad MA el 94 por ciento de los AGEB y el 6 por ciento un grado M.
- Zona Sur: El grado de vulnerabilidad MA en el 61 por ciento de los AGEB, en grado M se encuentra el 3 por ciento de los AGEB y 36 por ciento presentó un grado de MB.
- Zona Centro: El grado de vulnerabilidad predominó el MA en el 92 por ciento de los AGEB y en grado MB en el 8 por ciento.
- Zona Poniente: Los niveles de vulnerabilidad en un nivel MA representó el 2 por ciento de los AGEB, aunque predominó el grado MB con el 96 por ciento, el 2 por ciento presenta un nivel medio de los AGEB.
- Zona Oriente: Esta zona que concentra el que mayor número de AGEB de la ciudad, el grado de vulnerabilidad es MA en el 5 por ciento de los AGEB, en el 9 por ciento el nivel fue A y en el 86 por ciento de los AGEB el grado es M.



**Figura 1.** Zonificación por AGEB urbano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Fuente: Elaboración Propia

De los 214 AGEB que componen la ciudad, 90 presentaron una vulnerabilidad MA que representa el 42 por ciento de todos los que se tomaron en cuenta, en el nivel A de vulnerabilidad apenas lo presentaron 5 AGEB que representa solo el 2.3 por ciento, en el nivel M se encuentran 54 AGEB teniendo una representación del 25 por ciento del total, para finalizar el nivel de vulnerabilidad MB represento el 30 por ciento en el cual agrupó 65 AGEB (ver figura 2).



**Figura 2.** Índice de Vulnerabilidad por exposición a inundaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

Esta investigación contribuye a dimensionar parte del sistema vulnerable, el cual sirve para identificar la población expuesta, enfocar proyectos sociales a través de los instrumentos de política



pública que coadyuven en establecer mecanismos para propiciar comunidades más resilientes ante los efectos de futuros eventos de lluvia intensa o extrema, se logró identificar el nulo control que define el crecimiento urbano de la ciudad.

Si bien es prácticamente imposible erradicar la vulnerabilidad de manera total, cada poblamiento rural-urbano que presenta rezago social, económico y carencias en la infraestructura, aumenta la probabilidad la exposición de la población y sus bienes ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos como las lluvias convectivas en las colonias o AGEB.

La sensibilidad de los habitantes ante la presencia de un evento ha disminuido las capacidades de cada individuo a mejorar las condiciones de habitabilidad en los espacios urbanos, aumenta el tiempo de recuperación de estos sectores sociales que se integran al área urbanizada; es la población con menos recursos quienes quedan excluidos de los programas sociales como el censo de afectaciones, este ha sido un mecanismo de gestión que induce atender y/o reducir las afectaciones según sus condiciones de daños de los habitantes, pero no capacita a las personas afectadas para aumentar su conocimiento y mejorar la calidad de vida para establecer ciudades sostenibles.

Para hacer de Tuxtla Gutiérrez una ciudad sostenible, se requiere de la atención prioritaria de los problemas identificados en los instrumentos operativos de planeación territorial como los puntos de presión señalados en el atlas de riesgos municipal o se generen proyectos focales que integren las escalas territoriales intraurbanas como lo es AGEB o manzana. Se induce al desarrollo de programas sectorial en la gestión sustentable que fortalezca al conocimiento sobre las condiciones socioambientales locales para alcanzar la capacidad de población para reducir la exposición ante la presencia de eventos de lluvia intensa o extrema que se asocian a los efectos del cambio climático en la región.

El conocimiento de las áreas de inundación, se deberán establecer análisis de correlación con las variables sociodemográficas que fomentan el aumento de la exposición de los habitantes en cada Área Geoestadística Básica Urbana en función del índice general obtenido. La construcción de indicadores permite actualizar los instrumentos de planeación territorial operativos como atlas de peligros y/o riesgos a escala más detallada.

## Referencias

- Adger, W. N. (1999). Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. *World Development*, 27(2), 249-269.
- 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. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 33-55. Recuperado en 18 de agosto de 2024, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000500033&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500033&lng=es&tlng=es).
- Argüello, M. T. R., Guichard, R. D. R., Aguilar, S. M. Á. y Argüelles-León, B. E. (2020). Identificación de la vulnerabilidad urbana por inundaciones en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Revista Pakbal*, 19(49), 29-37. Consultado en [https://www.ingenieria.unach.mx/images/Articulos\\_revista/revistapakbal\\_49\\_completa\\_opt.pdf](https://www.ingenieria.unach.mx/images/Articulos_revista/revistapakbal_49_completa_opt.pdf)

- Ávila, F. O. (2016). *La habitabilidad de las viviendas en la zona metropolitana de Toluca*. Tesis doctoral. Facultad de Planeación Urbana y Regional. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2010). *Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgos: Programa para América Latina y el Caribe: Informe resumido (No. 42398)*. Inter-American Development Bank. 45 pp.
- Bhattarai, K. y Conway, D. (2010). Urban Vulnerabilities in the Kathmandu Valley, Nepal: Visualizations of Human/Hazard Interactions. *Journal of Geographic Information System*, 2, 63-84.
- Cadena, E. y Campos, J. (2012). Vulnerabilidad social y comportamiento social. Un análisis por secciones electorales. *Revista papeles de población*. No 71. CIEAP/UAEM. 1-43 pp.
- Cadena, E. y Campos, J. (2012). Vulnerabilidad social y comportamiento electoral: Un análisis por secciones electorales. *Revista papeles de población*. No 71. CIEAP/UAEM. 1-43 pp.
- Cajigal-Molina, E., & Maldonado-González, A. L. (2019). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergente ante el cambio climático. Economía Sociedad Y Territorio*, 543-574. <https://doi.org/10.22136/est20191342>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y Sistema Nacional de Protección Civil, (2017). *Manual de Busca Ciclones 3.0*. Subdirección de fenómenos hidrometeorológicos. CENAPRED. México D.F.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC) y Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC). (2012). *Inundaciones*. CENAPRED. México D.F.
- Chávez-Cortés, M. M., Binnqüist-Cervantes, G., & Salas-Flores, A. C. (2017). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(10), 97-109. <https://doi.org/10.19136/era.a4n10.816>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2010). *Plan de emergencia de inundación. Corrientes problemáticas río Sabinal, estado de Chiapas*. Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) and Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2011). *Estudio de Riesgos de Inundaciones en Zonas Urbanas de la República Mexicana*. México: IMTA.
- Díaz Caravantes, R. E. (2018). Vulnerabilidad y riesgo como conceptos indisociables para el estudio del impacto del cambio climático en la salud. *Región y sociedad*, 30(73). <https://doi.org/10.22198/rys.2018.73.a968>
- García-Benítez, M. (2018). *Vulnerabilidad Urbana por Ciclones Tropicales en Dos Ciudades del estado de Yucatán*. (Tesis de Doctorado), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, Estado de México.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. Bogotá, D.C. 110
- Instituto Estatal del Agua (2013). *Plan de Gestión y manejo Integral de la cuenca del Rio Sabinal*. México: Instituto Estatal del Agua.

- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.), *Panel Intergubernamental de Cambio Climático*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2012). *Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*. Contribución de los Grupos de Trabajo I y II. Bonn. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Islebe, G. A., Torrescano-Valle, N., Valdez-Hernández, M., Tuz-Novelo, M., & Weissenberger, H. (2009). Efectos del impacto del huracán Dean en la vegetación del sureste de Quintana Roo, México. *Foresta Veracruzana*, 11(1), 1-6.
- Jabareen, Y. (2012). Vulnerability of cities to extreme space weather events: A new frontier of a multidisciplinary urban research. *Natural Science*, 4(6), 368-371.
- Lampis, A. (2013). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición. Cuadernos de Geografía. *Revista Colombiana de Geografía*, 22(2), 17-33.
- Landa, R., Magaña, V. y Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. SEMARNAT. 135 pp.
- Meyer-Arendt, K.J., (1999). Impacto ambiental provocado por el cambio del uso de suelo en la zona de Progreso, Yucatán en UADY, *Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán* (pp. 259-261). Universidad Autónoma de Yucatán, México City.
- Monterroso-Rivas A. I. (2012). *Contribución al estudio de la vulnerabilidad a cambio climático en México*. Tesis Doctoral en Geografía. FFyL. UNAM.
- Mundo, M., y Martín, D., (2014). Razones técnicas para no construir una presa rompepicos aguas debajo de los arroyos San Francisco y Berriozábal en la subcuenca del río Sabinal, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Revista Pakbal*, 3(30), 5-17.
- Narváez, L., Lavell, A., & Ortega, G. P. (2009). *La gestión del riesgo de desastres* (Primera ed., Vol. 1). Pull Creativo.
- Organización de Naciones Unidas (ONU). (2020). *Marco de colaboración de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible de México*. Organización de Naciones Unidas México. CDMX
- Organización de las Naciones Unidas para la educación, Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2012). *Gestión para la Reducción del Riesgo de Desastres y Sistemas de Alerta Temprana*. Costa Rica: Orellana.
- Parroquin-Pérez, R., Uehara-Guerrero, M. G. N., & Sánchez-Correa, L. A. (2018). Resiliencia urbana en eventos por inundación: experiencias para medir, evaluar y mejorar las políticas públicas. *RUA*, 20(10), 57-67. <https://doi.org/10.25009/rua.v10i20.43>
- Pizarro, R., Ramírez, C., & Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque (Valdivia)*, 24(3), 31-38. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002003000300003>
- Rodríguez Van Gort, M. F. (2019). Cuantificación de vulnerabilidad y riesgo: las inundaciones en Motozintla de Mendoza, Chiapas, México. *Revista Cartográfica*, 97, 81-104. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i97.177>

- Romero G. (Corresponsal). (2016). Lluvias dejan dos muertos en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Excelsior*. Publicado el 3 de septiembre de 2016 en <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/09/03/1114796>
- Saaty, T. (1988). *The analytical hierarchy process*. Mc Graw Hill.
- Sánchez-Rodríguez, R., y Bonilla, A. (2007). *Urbanización, cambios globales en el ambiente y desarrollo sustentable en América Latina*. Instituto Interamericano para la Investigación sobre Cambio Global (IAI), Instituto Nacional de Ecología – (INE) y United Nations Environment Programme (UNEP). São José dos Campos, Brasil. 216 pp.
- Secretaría de Obras Públicas (SOP), Secretaría de Protección Civil (SPC). (2013). *Plan de Gestión y manejo Integral de la cuenca del Río Sabinal*. Instituto Estatal del Agua. Gobierno del estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Secretaría de Protección Civil Municipal (2015). *Atlas de riesgos del municipio de Tuxtla Gutiérrez*. Protección Civil. Gobierno municipal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Consultado en <https://tuxtla.gob.mx/atlas/archivos/Atlas-de-riesgos-Act-2015.pdf>
- Silva-Cervantes, M., Hernando, A., García-Abril, A., Valbuena, R., Velázquez S. J. y Manzanera, J. A. (2020). Simulación e umbrales de desbordamiento en cuencas urbanas: caso de estudio en Tuxtla Gutiérrez, México. *Investigación y aplicaciones fluviales*, 36(6), 873-990. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.3642>
- Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013). *Diseño de Dren Pluvial de la cuenca Centro Sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (No 1)*. UNACH. Consultado en <https://promep.sep.gob.mx/archivospdf/INFORMES/Producto2175475.PDF>
- Vásquez, M., Espíritu, G., Morales, H., Montoya, G., Navarrete, D. (2009). Riesgo por inundaciones en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México en *La Gestión del Riesgo Urbano en América Latina: Recopilación de artículos* (pp. 143-158). Panamá: EIRD.

# Percepción del riesgo y participación social para la resiliencia ante inundaciones en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Gisselle Isabeau Ballinas-Altamirano<sup>1</sup>, Andrea Venegas-Sandoval<sup>1\*</sup>,  
Marcelino García-Benítez<sup>1</sup>, Antonio Saldívar-Moreno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático  
de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
(IIGERCC-UNICACH); Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

<sup>2</sup>Departamento de Sociedad y Cultura de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR);  
San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

\*andrea.venegas@unicach.mx

## Resumen

**A**demás de la magnitud y frecuencia de los riesgos climáticos, el carácter complejo e impredecible de las ciudades representa un desafío para la gestión ante el Cambio Climático. Este es el caso de Tuxtla Gutiérrez, donde factores como el clima, los asentamientos irregulares y la ineficacia de las obras hidráulicas, han exacerbado las inundaciones.

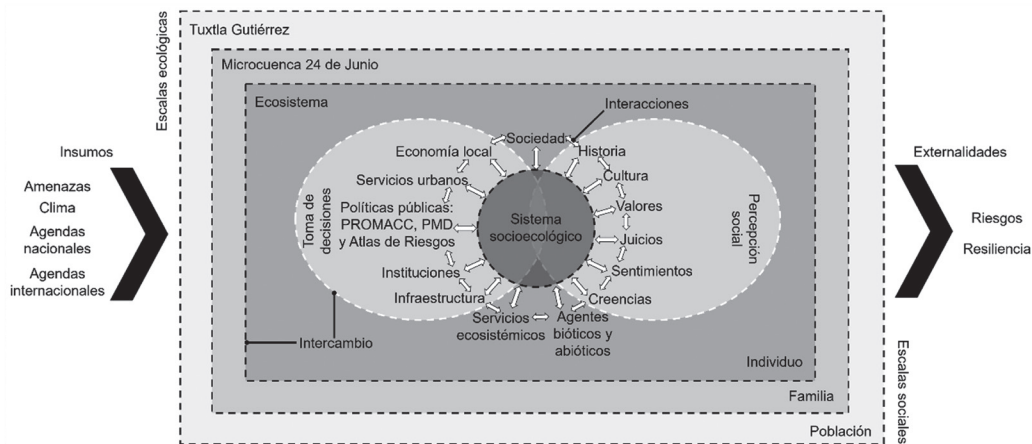
Con la finalidad de contar con una perspectiva sistémica se adoptó la conjetura de los sistemas socioecológicos que es aquella perspectiva que aborda al sistema, como aquel que consta del acoplamiento de la dimensión social con la ecológica, y que, además, permite reconocer la importancia de la participación y el conocimiento local como procesos cognitivos esenciales para enfrentar adversidades. Se seleccionó al fraccionamiento El Bosque, para aplicar una encuesta estructurada con reactivos configurados con la escala Likert para así explorar la percepción de la población.

Los resultados se clasificaron en seis rangos actitudinales según el nivel de interés y resiliencia mostrado. Se encontró que la mayoría de los participantes se situaron en un rango actitudinal regular, relacionado con una participación y resiliencia moderadas. Resultó controversial hallar que las personas no consideraran a las inundaciones como un problema, a pesar de que en el fraccionamiento se han reportado inundaciones. Las personas entrevistadas externaron desconfianza en las autoridades y bajo nivel de participación; sin embargo, reconocieron la relevancia del cuidado ambiental y la necesidad de colaboración para enfrentar los riesgos climáticos. Lo anterior, representa una oportunidad para fortalecer la resiliencia.

**Palabras clave:** Inundaciones urbanas, participación, sistemas socioecológicos, cambio climático, sureste mexicano.

## Introducción

El cambio climático representa uno de los retos más significativos a nivel internacional para la gestión política y el desarrollo socioeconómico, debido a los impactos y repercusiones sobre las personas, los sistemas naturales y los servicios económicos, especialmente en las ciudades, donde se concentran las desigualdades y las vulnerabilidades socioambientales (Soares y Murillo-Licea, 2013; Ruiz-Meza, 2014).



**Figura 1.** Marco conceptual de los sistemas socioecológicos.

Aunque los riesgos climáticos siempre han existido, el cambio climático intensifica los efectos de los fenómenos meteorológicos sobre los sistemas humanos y naturales que se encuentran bajo cierta exposición geográfica (IPCC, 2020). Desde esta perspectiva, se define al riesgo climático como el potencial intensificado de las condiciones climáticas extremas e imprevisibles que acarrea impactos y perjuicios en distintas esferas como los medios de vida, la salud, el bienestar, la economía, la infraestructura, los ecosistemas y las especies; principalmente, en aquellas que no cuentan con suficiente capacidad de adaptación (IPCC, 2023).

Entre los riesgos climáticos más frecuentes y dañinos se encuentran las inundaciones debido a su intensidad y el grado de impactos que pueden provocar en las actividades económicas fundamentales como la agricultura, el comercio, el transporte, la infraestructura y los servicios ecosistémicos de protección; e incluso provocar la pérdida de vidas humanas (ONU, 2008; Becerril-Tinoco, 2017).

Una inundación es un evento que resulta, por efecto de la lluvia, el oleaje, la marea de tormenta, o el colapso de alguna obra hidráulica; en el aumento o desborde en el nivel superficial del agua de los ríos, lagos o del mar, para ocupar lugares donde normalmente no se encuentra (Salas-Salinas y Jiménez-Espinosa, 2014).

En una ciudad media como Tuxtla Gutiérrez (Peña-Díaz, 2022) las inundaciones se han presentado como un fenómeno frecuente y perjudicial para la calidad de vida, los asentamientos y los servicios urbanos (García-Benítez *et al.*, 2022; Mora Chaparro *et al.*, 2023). Desde el 2000 hasta el 2024, en la ciudad se han publicado nueve declaratorias de desastre y emergencia de

bido a inundaciones que han provocado daños materiales, sociales y ambientales (CENAPRED, 2024) resultantes de precipitaciones que han oscilado entre los 83 mm y los 141 mm (Mora-Chaparro *et al.*, 2023).

Al mismo tiempo, la tendencia de precipitaciones en el municipio, en el contexto del cambio climático apunta, durante el presente siglo, hacia una reducción en el promedio de lluvias, aunque también se espera el aumento en el número de eventos extremos; pero no se cuentan con las capacidades ni medidas necesarias para enfrentar los impactos sociales y ambientales futuros (SEMARNAT, INECC y SEMAHN, 2015).

Según datos recientes, en 2021, Tuxtla Gutiérrez se posicionó como el segundo municipio con mayor número de pérdidas humanas relacionadas con las escorrentías, con tres víctimas (Matías-Ramírez y Ramírez-González, 2022). Así también, en 2022, tras las afectaciones del huracán Agatha en 37 municipios de México, únicamente Tuxtla Gutiérrez presentó dos inundaciones (Matías-Ramírez y Ramírez-González, 2023).

Dentro de la ciudad, entre las zonas que presentan mayor riesgo ante inundaciones y encharcamientos debido a las lluvias se encuentran el fraccionamiento El Bosque y el libramiento norte (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015; Mora Chaparro *et al.*, 2023). En estas áreas se han registrado múltiples incidentes como vehículos varados, viviendas inundadas, vialidades intransitables y el desbordamiento de arroyos; no obstante, la ocupación irregular de los cauces, la falta de mantenimiento de las obras hidráulicas y la irresponsabilidad de algunos habitantes que bloquean el flujo natural del agua han exacerbado estos eventos (Domínguez, 2020; Mora-Chaparro *et al.*, 2023; Ramos, 2024; López, 2024).

Una respuesta adecuada y efectiva implica contar con capacidad de resiliencia, es decir, con la habilidad de absorber las perturbaciones, reorganizarse y aprender de la experiencia, mantener la identidad y funcionalidad (Walker *et al.*, 2002), a partir de principios como la diversidad, la conectividad, la retroalimentación, la innovación, el aprendizaje y la participación social (Biggs *et al.*, 2015). Sin embargo, existe poca evidencia de la existencia de estrategias sociales, incluso desde la normatividad, que reconozcan y adopten aspectos como la participación social, el conocimiento local, la diversidad de actores y la adaptabilidad como elementos cruciales para enfrentar riesgos, como las inundaciones (Mota-López, 2018). Frente a esta situación, el enfoque de los sistemas socioecológicos ha cobrado relevancia al ofrecer un paradigma holístico que reconoce la importancia de la colaboración social para fortalecer la capacidad de un sistema frente a las adversidades, dentro de una naturaleza constantemente cambiante, para la resolución de intereses comunes (Nkhata *et al.*, 2008; Hernández y Ramos, 2023; Berkes y Folke, 1998).

Bajo esta perspectiva, las ciudades y asentamientos humanos operan como un sistema socioecológico que comprenden una variedad de subsistemas o agentes (fauna/flora, individuos, instituciones, entre otros) con interacciones entre sí que influyen en las reacciones y percepciones (ideológicas y culturales) implicadas en la interpretación, toma de decisiones y mecanismos de resiliencia para actuar ante un desastre (figura 1) (Ruiz-Meza, 2014; Cerón-Hernández *et al.*, 2019; Movahed y Tabibian, 2020).

En ese sentido, la percepción social del riesgo, es crucial en el análisis de los riesgos (Reyes, 2016) porque, además de representar aspectos psicológicos y del medio físico (Álvarez, 2009;

Salazar *et al.*, 2012), es el componente central en el proceso cognitivo donde el ser humano asigna, atribuye o interpreta cualidades a las fuentes potenciales de peligro, las situaciones arriesgadas y sus consecuencias desde sus creencias, actitudes, juicios, sentimientos y valores (Álvarez, 2009; Salazar *et al.*, 2012; Ruiz-Meza, 2014; Reyes, 2016).

Así también, la influencia de la percepción individual y colectiva del riesgo es el resultado de factores externos como las dimensiones ideológicas, históricas, sociales, culturales, ambientales, económicas, políticas e institucionales que inciden en los procesos intrínsecos presentes en los patrones educativos, la generación, la edad y la etnicidad, entre otros que, en conjunto, trascienden en la toma de decisiones (Álvarez, 2009; Reyes, 2016).

Por tal motivo, es imperativo abordar la resiliencia frente a las inundaciones en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, bajo la óptica de los sistemas socioecológicos que considera a una ciudad como un sistema complejo y dinámico, en donde es relevante conocer la calidad de las interacciones. Estas interacciones pueden parecer simples a escala local, pero se acumulan y generan comportamientos y estructuras adicionales en múltiples escalas temporales y espaciales (Biggs *et al.*, 2015; Baggio y Calderón-Contreras, 2017).

De ese modo, este capítulo se concentra en analizar y describir la percepción y el nivel actitudinal de la población que implica la disposición a participar, que vive en una zona de alto riesgo de inundación en Tuxtla Gutiérrez y su relación con la resiliencia ante las inundaciones.

## Métodos y materiales

### Área de estudio

Tuxtla Gutiérrez se sitúa en la subcuenca del río Sabinal que forma parte de la región hidrológica XI Frontera Sur (Figuroa-Gallegos *et al.*, 2017), que alberga a más de 604 147 personas (52.41% son mujeres y el 47.59% son hombres) (INEGI, 2020). Desde 2010, su población ha experimentado un crecimiento del 9.18 %, con más de la mitad de sus residentes entre una edad joven-adulta (INEGI, 2020; García-Benítez *et al.*, 2023).

El predominante clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004), además de la morfología, la localización geográfica, así como la presencia de fenómenos hidrometeorológicos como las lluvias convectivas, el viento y los ciclones tropicales favorecen la presencia de inundaciones en la ciudad (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015; García-Benítez *et al.*, 2022).

Debido al crecimiento urbano, las zonas oriente y poniente de la ciudad albergan al 68.5% de los asentamientos urbanos vulnerables a las inundaciones, sin embargo, la zona nororiental ha destacado por su alto riesgo de inundación debido a la alta densidad poblacional y modernización desde 1960 (Álvarez-Simán *et al.*, 2015; Sistema Municipal de Protección Civil, 2015).

Las áreas más expuestas se sitúan cerca del margen del río Sabinal, principalmente, en lugares con pendientes pronunciadas, alta concentración poblacional e infraestructura pluvial deficiente que contribuyen en la acumulación del escurrimiento superficial (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015; Figuroa-Gallegos *et al.*, 2017; Mora-Chaparro *et al.*, 2023).



Un ejemplo claro es la microcuenca hidrográfica 24 de junio, situada al nororiente de Tuxtla Gutiérrez que, desde la parte alta, a 1 020 metros sobre el nivel del mar, recoge el agua de las precipitaciones y dirige el flujo a través de cauces naturales y artificiales hacia las zonas más bajas donde se encuentran las colonias 24 de junio, Infonavit Grijalva y El Bosque (Mora-Chaparro *et al.*, 2023). Frente al fraccionamiento El Bosque, el muro que sostiene al puente del libramiento norte provoca la acumulación del agua, y la convierte en una zona de peligro de inundación, además de cambiar la dirección y aporte del agua hacia el poniente de la ciudad (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015; Mora-Chaparro *et al.*, 2023).

### Ruta metodológica

Esta investigación se realiza desde una perspectiva cuantitativa basada en un dispositivo descriptivo-analítico, a partir de la escala de Likert, para explorar la percepción de la población en Tuxtla Gutiérrez respecto a las inundaciones.

Para delimitar el área de estudio, se consideró seleccionar una zona con la presencia de factores de exposición ante las inundaciones. De ese modo, se acotó el estudio al fraccionamiento El Bosque (figura 2), ubicada en la subcuenca hidrográfica 24 de junio, como una zona representativa debido a la frecuencia de las inundaciones; además de contar con pendientes pronunciadas, vialidades importantes cercanas y una alta densidad poblacional (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015; Mora-Chaparro *et al.*, 2023).

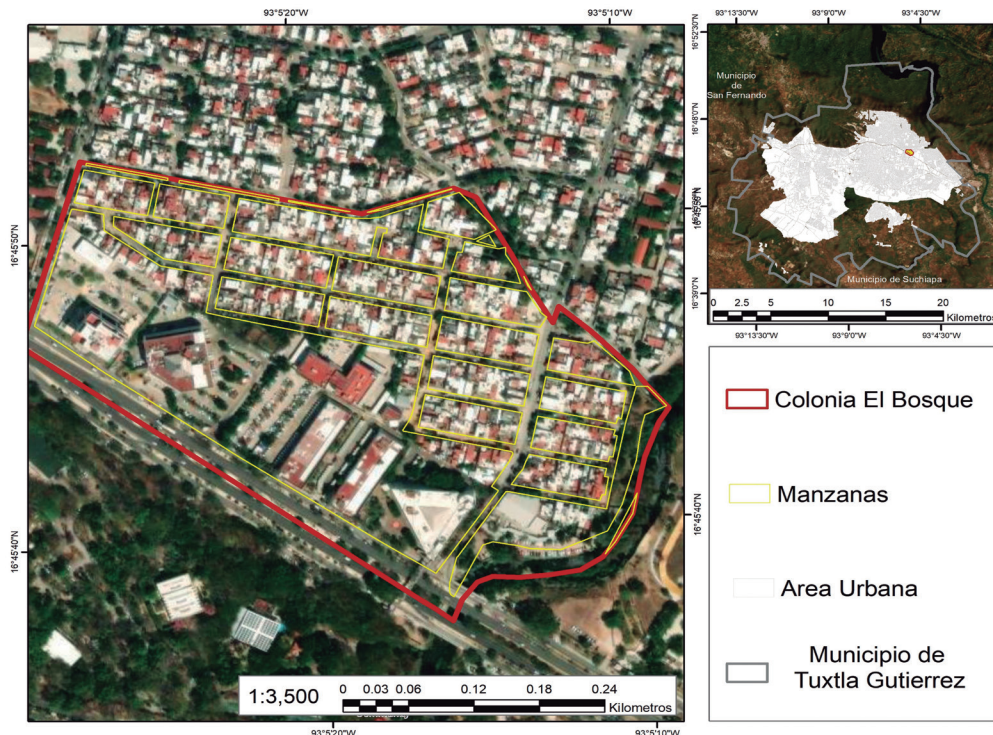


Figura 2. Colonia El Bosque.

Para recabar la información, se diseñó una encuesta dirigida a una muestra representativa de la población del fraccionamiento El Bosque que fue aplicada mediante el software SurveyMonkey (SurveyMonkey Inc., 2023) para agilizar la captura de los datos. Este programa también fue elegido por su compatibilidad con el software Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2021), versión 240, disponible para el sistema operativo Windows, para el posterior análisis de la información recopilada.

La muestra se calculó mediante la ecuación 1 y la información de las viviendas por manzana establecida en la base de datos por Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) disponibles en el Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE) del INEGI (2020). Se obtuvo un total de 60 viviendas a encuestar, con un intervalo de confianza del 90% y un error estimado del 10%.

**Ecuación 1.** Fórmula para obtener el número de muestras.

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N-1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q} = 60 \text{ viviendas}$$

Las preguntas se desarrollaron a partir de los parámetros de vulnerabilidad definidos en el Atlas de Riesgos del Municipio de Tuxtla Gutiérrez (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015) y la base de datos por AGEB del INEGI (2020), divididas en seis categorías: 1) Vivienda, 2) Bienes y servicios, 3) Salud, 4) Características del territorio y el gobierno, 5) Medios de comunicación y normatividad, y 6) Participación.

Con el fin de mantener un flujo lógico-semántico para cada categoría, se establecieron 12 preguntas de carácter introductorio, mientras que 24 preguntas corresponden a datos cuantitativos y 35 preguntas se relacionaron con la escala de Likert para asignar un nivel de actitud y participación como mecanismos de resiliencia en la población frente a las inundaciones (Castellanos-Galdámez *et al.*, 2022).

Para esta última categoría de preguntas, se estableció una escala de cinco puntos para cada posible respuesta: un punto refleja un alto grado de desacuerdo, dos puntos indica desacuerdo, tres puntos demuestra una posición neutral, cuatro puntos se relaciona con una postura de acuerdo y cinco puntos representa un alto grado de acuerdo.

La cifra mínima registrada fue de 78 puntos, mientras que la cifra máxima registrada fue 120 puntos. A partir de la diferencia entre ambas puntuaciones, se calculó la amplitud de rango. En seguida, se estimó el número de clases, mediante la ecuación 2, para asignar un rango de actitud y participación a las personas encuestadas. Esta fórmula consiste en elevar al número dos por un número donde el resultado sea mayor o igual al número de muestra ( $n$ ), previamente calculado con la ecuación 1.

**Ecuación 2.** Número de clases.

$$2^C \geq n$$

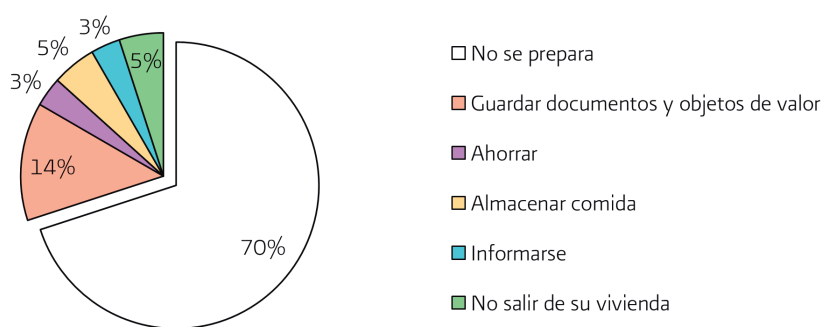
$$2^6 = 64 \geq 60 \therefore C = 6 \text{ clases}$$

Una vez determinado el número de clases, se calcula el intervalo o ancho de clases a partir de la división de la amplitud o rango entre el número de clases que da como resultado a 7 valores por clase. Finalmente, las seis clases se denominaron rangos actitudinales, los cuales son: muy negativo, implica a personas con nulo o casi nulo interés por los riesgos climáticos, por lo que se espera nula o mínima participación y muy baja capacidad de resiliencia; negativo, incluye a personas con poco interés por los riesgos climáticos, participación escasa y baja capacidad de resiliencia; regular, se refiere a personas con un interés neutral por los riesgos climáticos, donde la participación es moderada y la capacidad de resiliencia es intermedia; abierto, representa a personas con un interés moderado por los riesgos climáticos, donde la aportación, participación y resiliencia son potenciales; positivo, representa a personas con interés por los riesgos climáticos, por lo que el nivel de aportación, participación y resiliencia puede ser bueno; y finalmente, muy positivo, representa a personas con gran interés por los riesgos climáticos, por lo que se vinculan a un nivel alto de aportación, participación y resiliencia.

## Resultados

### ***Mecanismos y características generales frente a las inundaciones***

A través de la aplicación de la encuesta realizada a los habitantes del fraccionamiento El Bosque en Tuxtla Gutiérrez, se encontró que las afectaciones y perjuicios asociados a las inundaciones se vinculan a los bienes materiales y servicios domésticos (38%), a nivel estructural (25%) y en la salud (20%). Si bien, algunos daños fueron percibidos, el 70% de las personas no se prepara o anticipa frente a una posible inundación (figura 3); mientras que únicamente el 30% toma alguna medida de anticipación como el resguardo de documentos y objetos de valor (14%), almacenar víveres (5%) o quedarse en casa para atender las indicaciones de las autoridades (5%). En contraste, Sánchez-Zavalegui *et al.* (2023) documentaron que los habitantes de algunas comunidades rurales mayas, en Quintana Roo, afirmaron haber presentado pérdidas significativas ante las recurrentes amenazas hidrometeorológicas, como las inundaciones; por lo que, mantienen un estado de alerta constante. No obstante, los autores mencionaron que aquellas familias que evitan o buscan disminuir los efectos de las inundaciones cuentan con una mayor posibilidad de reducir la vulnerabilidad y los daños socioeconómicos.



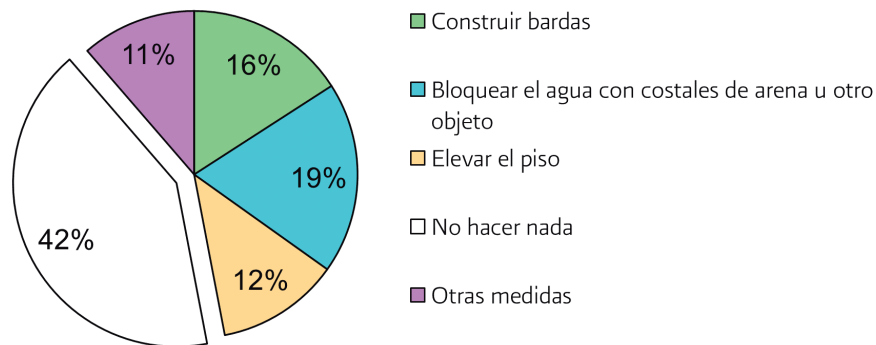
**Figura 3.** Gráfica de los mecanismos de anticipación frente a un riesgo climático.

En ese sentido, el bajo porcentaje de los mecanismos de anticipación reflejados en la población encuestada en el fraccionamiento El Bosque indica una menor posibilidad de enfrentar de manera eficaz las afectaciones en la población y sus viviendas cuando se presente una inundación porque, a medida que se carece de mecanismos de aprendizaje desde las experiencias pasadas la vulnerabilidad aumenta.

En los siguientes tres apartados se muestran las principales características relacionadas con los daños debido a las inundaciones en las viviendas, en los bienes materiales y servicios, las posibles implicaciones en la salud, así como las medidas para enfrentar las inundaciones.

### 1) Vivienda

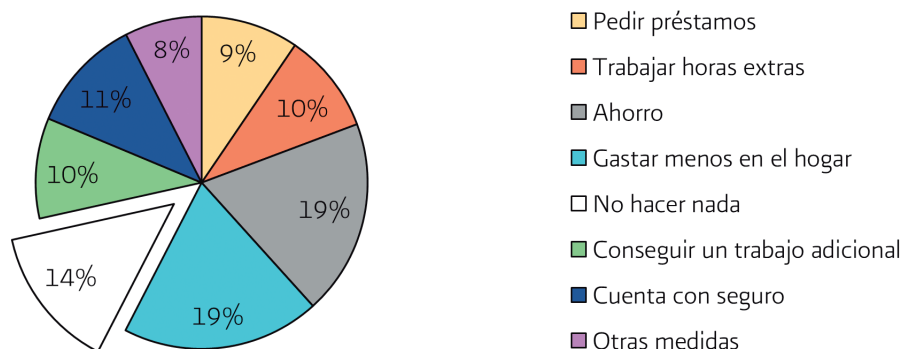
Se encontró que el 42% de los encuestados no emplea ninguna medida para enfrentar las inundaciones; mientras que, el 58% afirmó tomar alguna medida como obstaculizar el agua con costales de arena u otro objeto (19%), construir bardas (16%) y elevar el piso de su vivienda (12%) (figura 4).



**Figura 4.** Gráfica de las medidas para enfrentar las inundaciones.

### 2) Bienes y servicios

En caso de presentar afectaciones o pérdidas en los bienes materiales y servicios domésticos de las viviendas debido a las inundaciones, de acuerdo con algunos residentes en el fraccionamiento El Bosque, el 14% de las personas no implementa algún tipo de estrategia para cubrir los gastos económicos resultantes (figura 5); mientras que, el 86% mostró aplicar una amplia gama de estrategias como la reducción de los gastos en el hogar (19%), el ahorro (19%) o contar con un seguro contra desastres (11%).



**Figura 5.** Gráfica de las estrategias para cubrir gastos por daños o pérdidas de bienes y servicios.

### 3) Salud

Entre las posibles afectaciones en la salud relacionadas con las inundaciones, se encontró que el 20% de las personas encuestadas presentaron alguna enfermedad (gastrointestinal, oftalmológica, etc.) sin consecuencias o implicaciones graves.

Finalmente, aunque diversas formas de enfrentar las inundaciones fueron manifestadas, el 29% de las personas indicó no haber contado con ningún tipo de apoyo o asistencia durante o después de los perjuicios ocasionados; mientras que, el 13% recibió ayuda de familiares y/o amigos, 11% de vecinos, 9% de Protección Civil, 8% del ayuntamiento, 8% de bomberos, 8% de policías municipales, 7% de organizaciones no gubernamentales y 7% de otras instituciones.

Resulta interesante observar la aportación de Godefoy-Núñez *et al.* (2023) donde el 49% de la población en La Habana confía en familiares, vecinos y amigos como los principales encargados de brindar ayuda frente a los peligros asociados a las inundaciones, seguido del 37% de personas que reconocieron la ayuda brindada por su gobierno y los medios de comunicación masivos; a diferencia de la población de Tuxtla Gutiérrez.

#### **Características de resiliencia**

Se aprecia que la mayor parte de las personas se situaron en el rango actitudinal regular con 20 personas (33.33%) (tabla 1). Esto indica una población neutral debido a que no se encuentra suficientemente comprometida o relacionada con las estrategias para aumentar el nivel de respuesta y resiliencia ante riesgos climáticos. En seguida, se encuentra el rango actitudinal abierto con 15 personas (25%), que demuestra una condición potencial respecto a la posible apertura para el fortalecimiento de la resiliencia ante las inundaciones. En tanto, los rangos actitudinales negativo y muy negativo cuentan con 5 personas (8.33%) y 8 personas (13.33%) respectivamente; mientras que, los rangos positivo y muy positivo tienen 6 personas (10%) cada uno. De manera global, la puntuación media ( $= 98.5$ ) reveló un rango actitudinal regular por parte de la población encuestada.

**Tabla 1.** Rangos actitudinales de los residentes encuestados del fraccionamiento El Bosque.

Rango actitudinal	Descripción	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia
Muy negativo	Nula o casi nula participación y aportación	78	85	5
Negativo	Casi nula o muy poca participación y aportación	86	92	8
Regular	Participación y aportación regulares	93	99	20
Abierto	Participación abierta y aportación regular	100	106	15
Positivo	Participación y aportación buena	107	113	6
Muy positivo	Participación y aportación muy buena	114	120	6

Estudios similares relacionados con la resiliencia en México, también han mostrado niveles regulares o intermedios en el desarrollo de las fortalezas y el incremento de las posibilidades para enfrentar los riesgos como las inundaciones. Por ejemplo, en la ciudad de Aguascalientes, Cabañas Melo (2023) encontró un nivel de resiliencia regular respecto a los desafíos como la falta de coordinación social, el desarrollo de la conciencia ambiental y la participación social efectiva para la toma de decisiones sobre los riesgos.

Dentro del entorno rural se encuentra la investigación de Sánchez Zavalegui *et al.* (2023) en tres comunidades mayas de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo; donde más del 20% de las personas encuestadas señalaron como mala su capacidad para hacer frente a las inundaciones debido a la falta de capacitación técnica y de recursos económicos. En los siguientes tres apartados se caracterizan las percepciones relacionadas al territorio, los medios de comunicación, la normatividad y la participación que los residentes del fraccionamiento El Bosque vincularon para el caso de las inundaciones.

#### **4) Características del territorio y el gobierno**

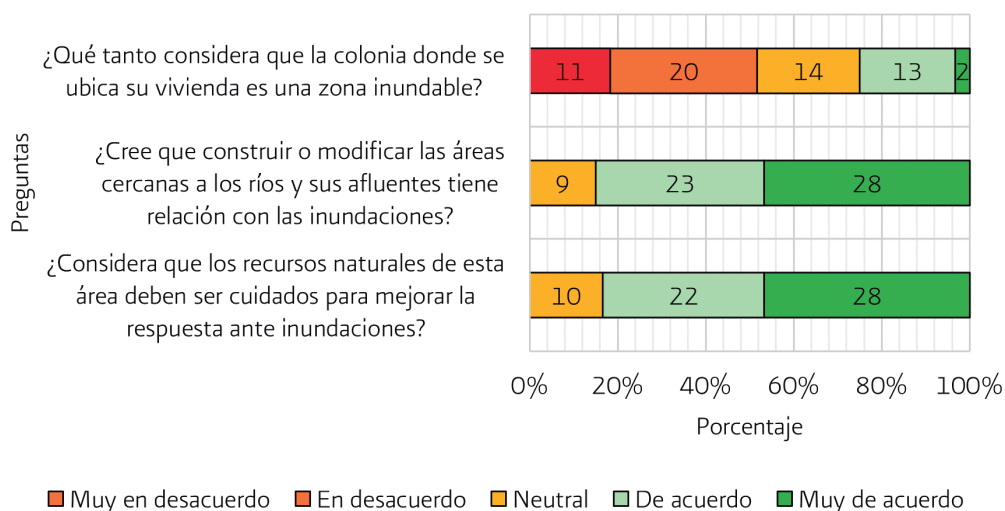
A pesar de que Tuxtla Gutiérrez ha presentado nueve declaratorias de emergencia y desastre por lluvias, y que las inundaciones son un problema típico en la zona estudiada (Mora-Chaparro *et al.*, 2023; CENAPRED, 2024), el 51.67% de las personas no consideró al fraccionamiento El Bosque como una zona susceptible a las inundaciones; mientras que, el 48.33 % de los encuestados consideran que se trata de una zona inundable o no se pronuncia al respecto (gráfica 4). Mientras que más de la mitad de la población no consideró a las inundaciones en el fraccionamiento El Bosque como un evento significativamente negativo, gran parte de los encuestados (92%) identificó la susceptibilidad de las vialidades cercanas (avenida Rosa del Poniente, avenida Rosa del Oriente y el Libramiento Norte) ante estos eventos. Además, el 85% de los encuestados identificaron al río Sabinal y el arroyo Bambú como los cauces más próximos a sus viviendas. Algunos de los comentarios más relevantes al respecto, son los siguientes:

“No creo que esta zona sea inundable, solo las vías principales. Por eso me gusta vivir en lo alto, ahí no se inunda. Es mejor vivir ahí porque no se encharca el agua como acá” (Señora 1).

“Aquí en el fraccionamiento no se inunda, pero todas las calles principales se inundan, y el problema es toda la tierra que viene con piedras y basura. También se ha llevado algunos carros y hasta a la gente” (Señora 2).

“Me agarro el agua caminando aquí... Lo bueno que pude subir por la Procuraduría, si no, me lleva el agua... Estaba por aquí y una señora se había caído, era mayor, y ya era tarde. Se lastimó muy feo y estaba todo inundado. No había un botiquín cerca. El caos se forma ahí (señalando al libramiento norte)” (Señora 3).

A su vez, las modificaciones estructurales, como las obras hidráulicas o la construcción de viviendas en las zonas cercanas a los cauces del fraccionamiento El Bosque, fueron señaladas por los encuestados como intervenciones que influyen en la presencia de inundaciones. Asimismo, las personas reconocieron la importancia de la protección de los recursos naturales como un rasgo de resiliencia ante los perjuicios de las inundaciones (figura 6).



**Figura 6.** Gráfica de las preguntas relacionadas con la percepción de las inundaciones del área de estudio.

Esta percepción es muy relevante, ya que, es posible identificar dentro de las acciones y propuestas establecidas en los instrumentos normativos como el Atlas de Riesgos del Municipio de Tuxtla Gutiérrez (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015), el Programa Municipal Ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez (PROMACC) (SEMARNAT, INECC y SEMAHN, 2015) y el Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024 (H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez y COPLADEM, 2022); la construcción de medidas de defensa estructural como una posible solución, pero las personas han visualizado negativamente estas intervenciones en el entorno.

Además, la opinión respecto a los trabajos y acciones preventivas realizadas por las autoridades municipales en el fraccionamiento El Bosque contrastó entre el 10% de las personas que mencionaron la construcción de un dren pluvial y los anuncios colocados en lonas sobre el libramiento norte; mientras que, el resto (90%) opina que las autoridades no han hecho nada para solucionar la problemática de las inundaciones.

En ese sentido, en el estudio realizado por Vergara *et al.* (2011) en Veracruz para explorar la percepción de la población sobre el riesgo, el desastre y la acción pública, se reveló que las expectativas sociales respecto a la calidad de la intervención por parte de las autoridades durante las emergencias son reducidas; sin embargo, las personas no exigen estrategias de prevención verdaderamente eficaces ante las inundaciones, ni la resolución de las omisiones o negligencias presentes durante la gestión de los riesgos.

### **5) Medios de comunicación y normatividad**

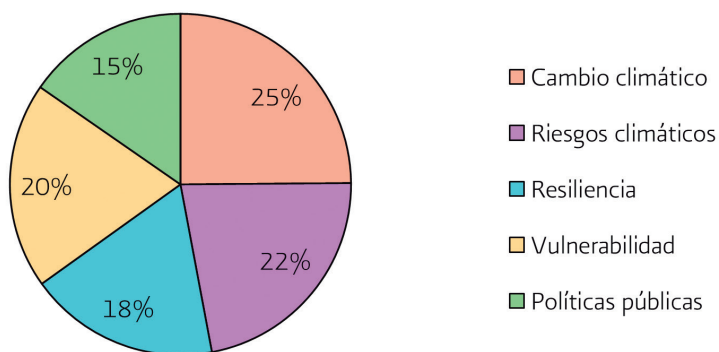
Como parte de los medios de comunicación mencionados por la población para informarse respecto al riesgo por inundaciones debido a la calidad y rapidez de la información recibida, se encontraron, en orden de preferencia: las redes sociales (21%), internet (19%), radio (17%), televisión (17%), periódicos (13%) y otros medios (13%).

Es interesante observar que en el contexto estudiado por Godefoy-Núñez *et al.* (2023), la población mencionó a la familia, los amigos y los vecinos como las principales fuentes de intercambio de información, además de considerar confiables a los medios de comunicación convencionales como la televisión, la radio y los periódicos.

Desde la visión de las comunidades estudiadas por Sánchez-Zavalegui *et al.* (2023), la radio prevalece en el 60% de la población como el medio de información más utilizado respecto a los fenómenos hidrometeorológicos. Mientras que el 30% de los residentes de estas comunidades afirmó contar con el acceso a los medios como la televisión o el internet, también se encuentran aquellos pobladores que no pueden tomar medidas de prevención de manera anticipada frente a las inundaciones, debido a que únicamente se informan por medio de los avisos compartidos por los líderes comunitarios y sus vecinos.

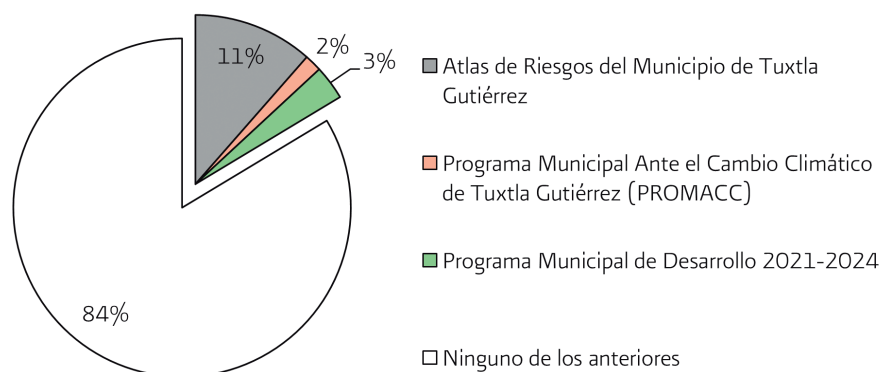
Esto implica, a manera de contraste, que la calidad y el acceso a los medios de comunicación no supone necesariamente que la población cuente con un nivel de familiaridad alto respecto a información sobre cambio climático. Al respecto, aunque los encuestados no presentaron dificultades de accesibilidad a la información referente a las inundaciones, se obtuvo que, solamente la cuarta parte de las personas participantes en el fraccionamiento El Bosque conocen el término cambio climático (25%), mientras que el concepto menos reconocido fue el de políticas públicas (15%) (figura 7). Esta situación demanda el aumento de los esfuerzos y acciones de divulgación dirigidos a los habitantes del municipio.





**Figura 7.** Gráfica de porcentaje de familiaridad con términos específicos.

Otro aspecto observado en la población de Tuxtla Gutiérrez es el desconocimiento sobre los instrumentos de normatividad relacionados con las estrategias y los objetivos para gestionar los riesgos climáticos como las inundaciones. Aunque dichos documentos contienen las líneas de acción específicas para la toma de decisiones y resolución de esta problemática, en el municipio, la mayor parte de la población encuestada desconoce su existencia (84%); mientras que, solo el 16% de la población mencionó conocer el Atlas de Riesgos del Municipio de Tuxtla Gutiérrez (Sistema Municipal de Protección Civil, 2015), el PROMACC (SEMARNAT, INECC y SEMAHN, 2015) y el Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024 (H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez y COPLADEM, 2022) (figura 8).

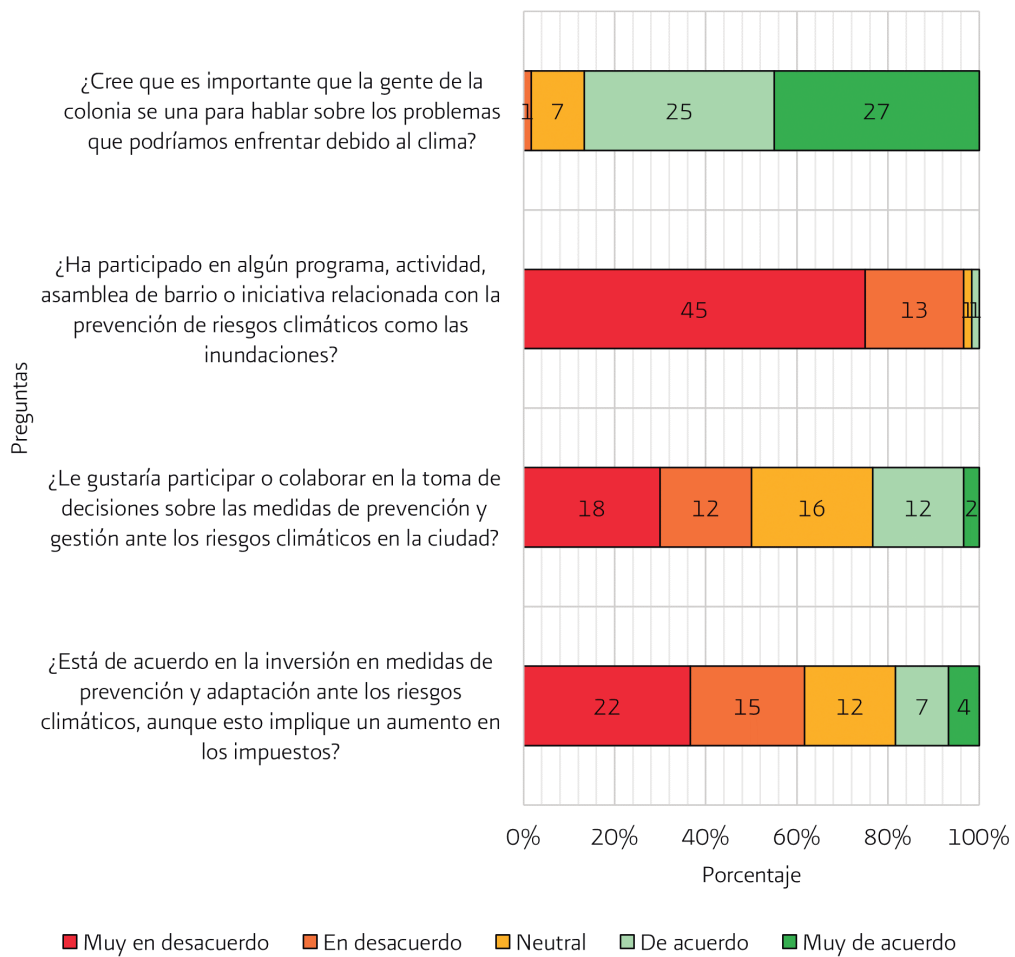


**Figura 8.** Gráfica de porcentaje asociado a las personas que se encuentran familiarizadas con los instrumentos de normatividad vigente.

El poco conocimiento respecto a los esfuerzos de la administración gubernamental en torno a las inundaciones es similar al aporte de Urbina (2015), que reflejó que el 85% de las personas no conoce el trabajo del gobierno mexicano respecto a los riesgos vinculados al cambio climático; además de establecer que los problemas ambientales ocupan el sexto lugar entre los asuntos más importantes para la sociedad a nivel nacional, sin embargo, solo fueron mencionados por el 7% de la población.

## 6) Participación

A pesar del nivel actitudinal regular mostrado en la población Tuxtla, se encuentra que el 86.67% de las personas afirmó sobre la importancia de la unión y el diálogo para resolver los asuntos referentes a los riesgos climáticos. Sin embargo, el 96.67% de las personas no ha participado en ninguna iniciativa, programa, actividad o asamblea vecinal relacionada con la prevención de las inundaciones. Al mismo tiempo, solo el 23.33% de las personas manifestó alguna posible intervención o colaboración en la toma de decisiones frente a los riesgos climáticos (figura 9).



**Figura 9.** Gráfica de las características de participación en el área de estudio.

Mientras que en algunos estudios se ha registrado un alto número de personas que reconocen el papel de las organizaciones del barrio como una de las principales vías de información u orientación para enfrentar los peligros (Godefroy-Núñez *et al.*, 2023), también se han encontrado escenarios que demandan el incremento del grado de conectividad en la población para facilitar

la comunicación, la coordinación en la toma de acción y la rendición de cuentas ante los riesgos como las inundaciones (Cabañas-Melo, 2023), como sucede en Tuxtla Gutiérrez.

Finalmente, se planteó a los encuestados del fraccionamiento El Bosque si aprobarían el aumento de impuestos para invertir en medidas de prevención y adaptación frente a los riesgos climáticos, principalmente las inundaciones, donde el 61.67% se mostró en desacuerdo, mientras que el resto se mostró neutral o de acuerdo.

## Conclusión

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez se presenta como un sistema socioecológico, una perspectiva que permite examinar la interacción entre la sociedad y la naturaleza a través de la percepción social del riesgo de inundaciones. Desde esta óptica, el compromiso participativo de la población reveló una desconexión con las propuestas de acción frente a las inundaciones. Esta situación resulta en una acción colectiva debilitada, donde la población desatiende los asuntos públicos y delega la responsabilidad al gobierno para la toma de decisiones y la gestión del territorio e infraestructura ante estos riesgos.

En la microcuenca 24 de junio en Tuxtla Gutiérrez, el crecimiento poblacional, la modernización estructural y la ampliación de vialidades han causado que los caudales de los cauces naturales y artificiales se acumulen en la parte baja, frente al fraccionamiento El Bosque, transformándose en una zona de alto riesgo de inundación que también afecta otras áreas del poniente de la ciudad. Estas condiciones subrayan la necesidad de una participación social efectiva en la gestión del riesgo de inundaciones, debido a la limitada retroalimentación e interacción entre la sociedad y el gobierno en la toma de decisiones y manejo del territorio.

El presente estudio destaca la necesidad de mejorar y fortalecer los mecanismos de participación, ya que la población no se encuentra suficientemente involucrada ni familiarizada con las estrategias para aumentar la resiliencia ante los riesgos de inundación. A pesar de que las políticas públicas de riesgo de desastre a nivel nacional han desarrollado una amplia gama de medidas de alerta y evaluación de fenómenos naturales, así como la integración de la vulnerabilidad en el diagnóstico y monitoreo de amenazas, se ha priorizado el desarrollo de instrumentos técnicos para la atención de emergencias, pero con baja capacidad para fomentar la interacción social y la toma de decisiones integral para una reglamentación, planeación y ordenamiento eficaces. Es crucial reducir vulnerabilidades e integrar activamente a la sociedad para desarrollar estrategias de respuesta ante las inundaciones para mejorar la resiliencia de la ciudad.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el aporte económico mediante la Beca Nacional para Estudios de Posgrado que contribuyó en la financiación de la presente investigación.

## Referencias

- Álvarez, G. (2009). Las percepciones del riesgo: el caso del huracán Stan en Motozintla, Chiapas en J. L. Cruz y Nazar A. (Eds.), *Sociedad y desigualdad en Chiapas. Una mirada reciente* (pp. 22-46). El Colegio de la Frontera Sur, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México.
- Baggio, J. y Calderón-Contreras R. (2017). Socioecosistemas y resiliencia en R. Calderón-Contreras (Ed.), *Los Sistemas Socioecológicos y su Resiliencia: Casos de Estudio* (pp. 23-38). Gedisa y Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México, México.
- Becerril-Tinoco, C.A. (2017). Resiliencia en el sistema socioecológico del Valle de Toluca ante problemas de estrés hídrico, en R. Calderón (Ed.), *Los Sistemas Socioecológicos y su Resiliencia: Casos de Estudio* (pp. 179-201). Gedisa y Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.
- Berkes, F. y Folke, C. (1998). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability en F. Berkes y C. Folke (Eds.), *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience* (1-25). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Biggs, R., Schlüter, M., y Schoon M.L. (2015). Principles for Building Resilience: Sustaining Ecosystem Services in *Social-Ecological Systems*. Primera edición. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Cabañas-Melo, L.S. (2023). *Análisis socioecológico de la resiliencia hídrica urbana en la ciudad de Aguascalientes*. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- CENAPRED (2024). Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2024. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Disponible en: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- Cerón, V.A., Fernández, G., Figueroa, A., y Restrepo, I. (2019). El enfoque de sistemas socioecológicos en las ciencias ambientales. *Investigación & Desarrollo*, 27(2), 85-109.
- Domínguez, A. (2020). Fraccionamiento en riesgo por lluvias. *Cuarto Poder*. 18 de abril de 2020. Disponible en: <https://www.cuartopoder.mx/chiapas/fraccionamiento-en-riesgo-por-lluvias/312919>
- Figueroa-Gallegos, J.A., Escobar-Castillejos, D., Guillén T., H. A. y Ruíz-Sibaja, J.A. (2017). Evidencias del cambio climático en la cuenca del Río Sabinal. *Lacandonia*, 11(1), 51-56.
- García-Benítez, M., Fernández-Alcántara, J.C., Bermúdez-Castillo, S.C., Zanteno-Hernández, M.A., Corzo-Matías, M.G. y Hernández-León, S.L. (2023). Índice multidimensional para determinar la habitabilidad urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 95 p.
- García-Benítez, M., Nucamendi-Hernández, S., y Ávila-Flores, O. (2022). Condiciones de habitabilidad ante inundaciones: el caso de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Revista Interdisciplinaria sobre Estudios Urbanos. Decumanus*, 8(8).
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Quinta edición. Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto de Geografía, México.

- Godefroy-Núñez, E., Cristiá-Lara, S. y Travieso-Montalván, C. (2023). La Habana: población, vulnerabilidad social y percepción del riesgo sobre los peligros hidrometeorológicos. *Estudios del Desarrollo Social*, 11(3).
- H. Ayuntamiento de Tuxtla Gutiérrez y COPLADEM (2022). Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024. *Comité de Planeación para el Desarrollo Municipal*. 146 p.
- Hernández, R.C. y Ramos, P.A. (2023). La restauración socioecológica: Potencialidades del uso del enfoque de los sistemas socioecológicos y el marco analítico de sistemas de innovación social. *Ecología Austral*, (33), 839-851.
- INEGI (2020). *Sistema para la Consulta de Información Censal 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- IPCC (2020). *The Concept of Risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A Summary of Cross-Working Group Discussions*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. 15 p. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/01/The-concept-of-risk-in-the-IPCC-Sixth-Assessment-Report.pdf>
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza. 184 p. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- López, I. (2024). PC de Tuxtla Gutiérrez emite mapa de zona de riesgo por inundación. *El Heraldo de Chiapas*. 14 de junio de 2024. Disponible en: <https://www.elheraldodechiapas.com.mx/local/pc-de-tuxtla-gutierrez-emite-mapa-de-zona-de-riesgo-por-inundacion-12087458.html>
- Matías-Ramírez, L.G. y Ramírez-González, N.D. (2022). *Catálogo de inundaciones 2021*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana y Centro Nacional de Prevención de Desastres. Ciudad de México, México. 42 p.
- Matías-Ramírez, L.G. y Ramírez-González, N.D. (2023). *Catálogo de inundaciones 2022*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana y Centro Nacional de Prevención de Desastres. Ciudad de México, México. 40 p.
- Microsoft Corporation (2021). Microsoft Excel. Versión 2407 para Microsoft 365 MSO de 64 bits. Disponible en: <https://www.microsoft.com/es-mx/microsoft-365/excel>
- Mora-Chaparro, J. C, Hernández-Borges, E. E. y Mora-Mora, L.L. (2023). Mapa de riesgos de inundación en la Microcuenca Hidrográfica 24 de Junio, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres. REDE*, 7(1), 116-130.
- Mota-López, A.M. (2018). Mecanismos para abordar la resiliencia urbana desde la escala local. *De Res Architettura*, 3, 66-75.
- Movahed, S., y Tabibian, M. (2020). Proposing a framework for city's ecological resilience pattern. *Motaleate Shahri*, 9(33), 109-126.
- Nkhata, A.B., Breen, C.M. y Freimund, W.A. (2008). Resilient social relationships and collaboration in the management of social-ecological systems. *Ecology and Society*, 13(1), 1-12.
- ONU (2008). *Climate Change and Disaster Risk Reduction*. Briefing Note. International Strategy for Disaster Reduction. Ginebra, Suiza. 12 p.

- Peña-Díaz, A. (2022). Poblamiento y producción territorial de Tuxtla Gutiérrez, ciudad intermedia y nodal de la Región I Metropolitana de Chiapas. *Horizontes Territoriales*, 2(4), 1-25.
- Ramos, A. (2024). ¡CUIDADO! Calles de Tuxtla Gutiérrez cerradas por las lluvias intensas de hoy 9 de julio. *Azteca Chiapas*. 09 de julio de 2024. Disponible en: <https://www.aztecachiapas.com/clima/cuidado-calles-tuxtla-gutierrez-cerradas-por-las-lluvias-intensas-hoy-9-julio>
- Reyes, A.C. (2016). Modelo teórico sobre la percepción social del riesgo y su relación con la cultura preventiva. *Multiciencias*, 16(4), 379-384.
- Ruiz-Meza, L.M. (2014). Género y percepciones sociales del riesgo y la variabilidad climática en la región del Soconusco. *Alteridades*, 24(47), 77-88.
- Salas-Salinas, M.A. y Jiménez-Espinosa, M. (2014). *Inundaciones*. Serie: Fascículos. Secretaría de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres. Distrito Federal, México. 56 p.
- Salazar, J., Montero, M., Muñoz, C., Sánchez, E., Santoro, E. y Villegas, J. (2012). Percepción Social en J.M. Salazar, M. Montero, C. Muñoz, E. Sánchez, E. Santoro y Villegas J.F. *Psicología Social* (pp. 77-109). Editorial Trillas, México.
- Sánchez-Zavalegui, R.A., Chávez-Alvarado, R., Barrera-Rojas, M.A., Cime-Ruiz, M.M. y Camacho-Sanabria, J.M. (2023). Vulnerabilidad social ante inundaciones pluviales en tres comunidades rurales mayas de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México. *Sociedad y Ambiente*, 26, 1-32.
- SEMARNAT, INECC y SEMAHN (2015). *Programa Municipal Ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez*. Cecropia. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 112 p. Disponible en: <https://www.cecropia.org/humana/tuxtla/data/proyectos/promacc/PROMACC.pdf>
- Sistema Municipal de Protección Civil (2015). *Atlas de Riesgos del Municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Sistema Municipal de Protección Civil de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- Soares, D. y Murillo-Licea, D. (2013). Gestión de riesgo de desastres, género y cambio climático. Percepciones sociales en Yucatán, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 10(72), 181-199.
- SurveyMonkey Inc. (2023). Versión 4.1.2. Disponible en: <https://es.surveymonkey.com>
- Urbina, J. 2015. La percepción social del cambio climático en el ámbito urbano en B. Espejel y C. Velazco-Samperio (Eds.), *La percepción social del cambio climático. Estudios y orientaciones para la educación ambiental en México* (pp. 21-37). Universidad Iberoamericana de Puebla, Puebla, México.
- Vergara, M., Ellis, E., Cruz, J. A., Alarcón, L. y Galván, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política y Cultura*, 36, 45-69.
- Walker, B., Carpenter, S., Anderies, J., Abel, N., Cumming, G., Janssen, M., Lebel, L., Norberg, J., G., Peterson, G. D., y Pritchard, R. (2002). Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology*, 6(1), 14.

# Monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Emmanuel Díaz-Nigenda<sup>1\*</sup>, Williams Vázquez-Morales<sup>1</sup>,  
Rebeca Isabel Martínez-Salinas<sup>2</sup>, Suhaila Elizabeth Díaz-Valencia<sup>3</sup>,  
Andrea Venegas-Sandoval<sup>1</sup>, José Francisco Pinto-Castillo<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

<sup>2</sup>Programa Educativo de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

<sup>3</sup>Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX.

\*emmanuel.diaz@unicach.mx

## Resumen

Hoy día, la contaminación del aire es una de las problemáticas ambientales que experimentan muchas regiones alrededor del mundo como resultado de su desarrollo económico. La calidad del aire de las ciudades es afectada por diferentes contaminantes, entre los cuales se encuentran las partículas  $PM_{10}$ , mismas que en altas concentraciones, ponen en riesgo a la población. En los últimos años, la calidad del aire en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se ha visto afectada por la presencia de humo como resultado de los incendios que se presentan en el estado, lo que en ocasiones ha propiciado la implementación de un plan de contingencia ambiental. Por ello, se realizó el monitoreo de partículas  $PM_{10}$  en los meses de marzo a mayo de 2016, 2019, 2023 y 2024, mediante un muestreador de bajo volumen (Minivol) con filtros de fibra de cuarzo, mismo que fue instalado con una estación meteorológica en tres sitios diferentes. En este sentido, este trabajo tiene como objetivo presentar la información obtenida del monitoreo atmosférico, misma que indica que en 2016 y 2024 se tuvieron las concentraciones más altas de partículas, mientras que la concentración máxima ( $385\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) fue reportada en 2016; por el contrario, las más bajas se obtuvieron en 2019. Por otro lado, los eventos de altas concentraciones fueron más frecuentes en 2024. Los resultados muestran que los escenarios de contaminación se presentan cuando la región está bajo la influencia de sistemas anticiclónicos que favorecen atmósferas estables, mismos que parecen incrementar su severidad con el paso del tiempo.

**Palabras clave:**  $PM_{10}$ , incendios, Tuxtla Gutiérrez

## Introducción

La contaminación del aire es uno de los retos ambientales de mayor complejidad en todo el mundo. A partir de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 2024) se puede definir a la contaminación atmosférica como la presencia en el aire ambiente de gases y/o partículas que modifican la composición y condición natural de la atmósfera, lo cual tiene implicaciones en la salud de la población, en la visibilidad, en la vegetación, en el clima, entre otros. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2022), un alto porcentaje de la población mundial vive en lugares donde no se respetan los valores guía de calidad del aire y se estima que la contaminación atmosférica local, tanto en las ciudades como en las zonas rurales de todo el mundo, provoca la muerte de millones de personas cada año; lo cual está relacionado a la presencia de partículas en el aire ambiente.

Para Aragón-Piña (2011), las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por diversas fuentes a mencionar: erosión eólica del suelo, erupciones volcánicas, incendios forestales, quema de combustibles fósiles, quemas en campos agrícolas, procesos industriales, actividades de extracción, emisiones domésticas, procesos de combustión, entre otras. Cárdenas-Moreno *et al.* (2021) menciona que estas partículas se clasifican de acuerdo al tamaño de su diámetro, entre las que se encuentran aquellas con diámetros aerodinámicos menores a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). La presencia de partículas  $\text{PM}_{10}$  en el aire ambiente incide negativamente sobre la calidad del aire y está asociada al aumento del riesgo de enfermedades cardiovasculares (Vaduganathan *et al.*, 2016; Dai *et al.*, 2018) y respiratorias (Luong *et al.*, 2017; Priyankara *et al.*, 2021), así como de cáncer pulmonar (Yanagi *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2017). La contaminación del aire se asocia a la exacerbación de síntomas e implica un mayor riesgo en salud para personas que presentan la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, asma y otras enfermedades respiratorias (OMS, 2023; Ubilla y Yohannessen, 2017).

Lo anterior resulta de gran interés al considerar que en Chiapas, los incendios forestales afectan grandes extensiones del territorio. Al respecto, el Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2024) reporta que en el estado se siniestraron 31,846 ha ( $\pm 22,733$  ha) anuales durante el período del 2016 al 2023, lo anterior como resultado de 374 ( $\pm 57$ ) eventos al año. De acuerdo a SEMAHN (2022), los incendios forestales, así como las quemas agrícolas, suelen presentarse en los meses de marzo a mayo, mismos que definen la temporada de estiaje en la entidad. Estos fenómenos se encuentran asociados a la emisión de diferentes contaminantes, entre ellos las partículas  $\text{PM}_{10}$  (SEMAHN, 2018; Fonseca-Hernández *et al.*, 2018)

Con base en lo anterior y al considerar que en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, la contaminación atmosférica es una problemática que ha venido gestándose año con año, lo cual ha sido evidente con los escenarios en los que la ciudad se cubre de humo, mismos que parecen incrementar su severidad con el paso del tiempo como resultado de las quemas y los incendios forestales que se presentan en el estado, así como de las condiciones meteorológicas en la temporada, resulta de gran importancia la generación de información que permita estimar las condiciones ambientales



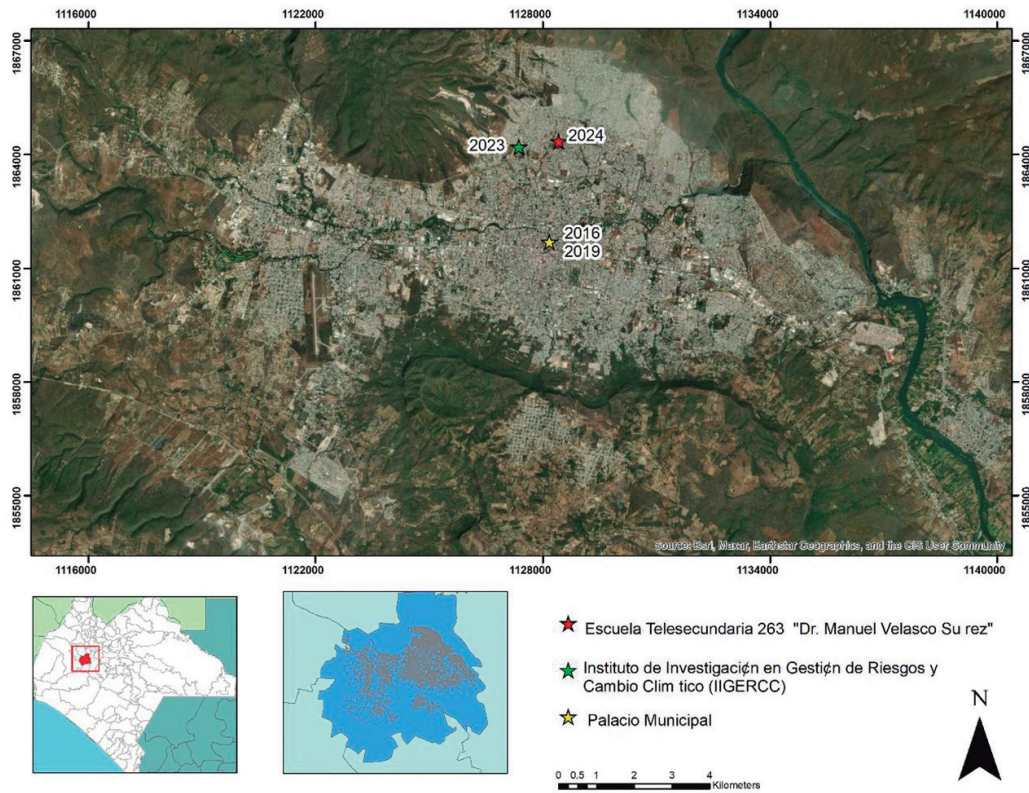
con la finalidad de establecer las bases que ayuden a implementar una adecuada gestión de la calidad del aire en la ciudad. Así, este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos del monitoreo de partículas  $PM_{10}$  en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, durante el período de marzo-mayo en cuatro diferentes años.

## Métodos y materiales

### *Zona de estudio*

De acuerdo con el Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica (CEIEG, 2024), Tuxtla Gutiérrez se ubica en el sureste de México dentro de las coordenadas extremas:  $16^{\circ} 40' 30''$  y  $16^{\circ} 48' 00''$  latitud norte,  $93^{\circ} 01' 35''$  y  $93^{\circ} 13' 10''$  longitud oeste, a una altitud de 522 metros sobre el nivel medio del mar (figura 1). La ciudad ocupa una superficie de  $334.61 \text{ km}^2$  en la cuenca baja del río Sabinal; al norte colinda con las montañas del Parque Nacional Cañón del Sumidero, al este con el río Grijalva y la ciudad de Chiapa de Corzo, al sur con la Mesa de Copoya y el Cerro de Mactumatzá, al oeste con las montañas que integran la cuenca alta del río Sabinal. Las zonas poniente, centro y oriente de la zona urbana ocupan un relieve integrado por planicies colinosas y valle, formado por arenisca y material aluvial, respectivamente; la zona norte de la capital se establece sobre un relieve montañoso constituido por una asociación de caliza-arenisca, mientras que la parte sur considera un piedemonte formado por lutita, limolita y arenisca. El tipo de clima presente está catalogado como cálido subhúmedo con lluvias en verano (Morales-Iglesias *et al.*, 2017; CEIEG, 2024). La región es ampliamente afectada por la entrada de Frentes Fríos y Nortes durante la temporada invernal, favoreciendo vientos del noroeste con intensidades superiores a los  $8 \text{ m/s}$  y temperaturas de hasta  $15^{\circ}\text{C}$  asociadas a condiciones de inestabilidad generadas por estos fenómenos.

La ciudad ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos años, cuya población es de 604,147 habitantes (CEIEG, 2024), ubicándola en una de las zonas metropolitanas de mayor importancia para el estado de Chiapas; lo que trae como consecuencia la presencia de calles sin pavimentar que son fuentes de emisión de partículas que afectan la calidad del aire de la ciudad (Díaz-Nigenda *et al.*, 2018), otras fuentes de contaminantes atmosféricos son el transporte, la falta de gestión de los residuos municipales y agrícolas, la producción y preparación de alimentos que emplean leña o carbón en su proceso (Díaz-Nigenda *et al.*, 2021), además de ser ampliamente influenciada por incendios forestales y quemas de predios que ocurren a los alrededores de la ciudad.



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio. Al interior se señalan los puntos utilizados para el monitoreo de la calidad del aire.

## Muestreo

Se utilizó un equipo muestreador de partículas de bajo volumen (Minivol Portable Sampler, Air-metrics modelo TAS-5.0 SN:6500, Springfield, Oregon, USA) a una razón de flujo de 5 L/min y filtros de fibra de cuarzo de 45mm de diámetro fueron utilizados para el muestreo de partículas  $PM_{10}$  en períodos de 24h durante los meses marzo, abril y mayo de los años 2016, 2019, 2023 y 2024. Así mismo, una estación meteorológica fue empleada para la medición de los parámetros meteorológicos. Los equipos fueron instalados en los sitios que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Ubicación de los sitios de monitoreo.

Año	Sitio	Coordenadas
2016 2019	Palacio Municipal	16° 45' 19.27" N, 93° 06' 56.49" W
2023	Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGERCC)	16° 46' 41" N, 93° 7' 18" W
2024	Escuela Telesecundaria 263 "Dr. Manuel Velasco Suárez"	16° 46' 44.6" N, 93° 6' 42.6" W

Cabe señalar que, en los años 2016 y 2019, los muestreos se realizaron diariamente, daban inicio a las 8:00h del día y finalizaban a la mañana siguiente, esto por cuestiones de logística derivadas de aspectos de seguridad y acceso a las instalaciones donde se tenía el equipo de muestreo. Para el caso del 2023 y 2024, los muestreos se efectuaron en días intercalados; para los días en que eran realizados, la actividad daba inicio a las 00:00h del día y finalizaba a las 23:00h del mismo día.

Para el cálculo de concentraciones se siguió el procedimiento establecido en el manual del equipo de muestreo (Airmetrics, 2020). En este sentido, la masa total de partículas colectadas se determinó mediante la ecuación:

$$M_{pm} = (P_f - P_i) * 10^6 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

donde:

$M_{pm}$  = Masa de partículas retenida en el filtro en  $\mu\text{g}$ .

$P_f$  = Peso del filtro después del muestreo previo acondicionamiento (g).

$P_i$  = Peso del filtro antes del muestreo previo acondicionamiento (g).

El flujo de aire que pasó a través del filtro en condiciones ambientales registradas ( $Q_{act}$ ) está dado por:

$$Q_{act} = (m_{vol} * Q_{ind} + b_{vol}) * \sqrt{\frac{P_{std} * T_{act}}{P_{act} * T_{std}}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde:

$m_{vol}$  y  $b_{vol}$  = son datos de calibración del equipo.

$Q_{ind}$  = Punto fijo del rotámetro.

$P_{std}$  y  $T_{std}$  = Presión y temperatura en condiciones normales (760 mmHg y 273°K).

$P_{act}$  y  $T_{act}$  = Presión y temperatura ambiente (en mmHg y °C).

A partir de la ecuación 2, el volumen de aire ( $V_{act}$ ) durante el período de muestreo se calculó mediante la siguiente expresión:

$$V_{act} = \frac{60 \frac{\text{min}}{\text{h}} * Q_{act} * t_h}{1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3}} \quad \text{Ecuación 3)}$$

donde:

$t_h$  = tiempo de operación del equipo.

Finalmente, la concentración de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en las condiciones ambientales de la región, se calculó mediante:

$$PM_{act} = \frac{M_{pm}}{V_{act}} \quad \text{Ecuación 4)}$$

El límite máximo permisible (LMP) establecido en la NOM-025-SSA1-2021 ( $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) fue utilizado para la comparación de los resultados en los diferentes períodos en los que se realizó el muestreo.

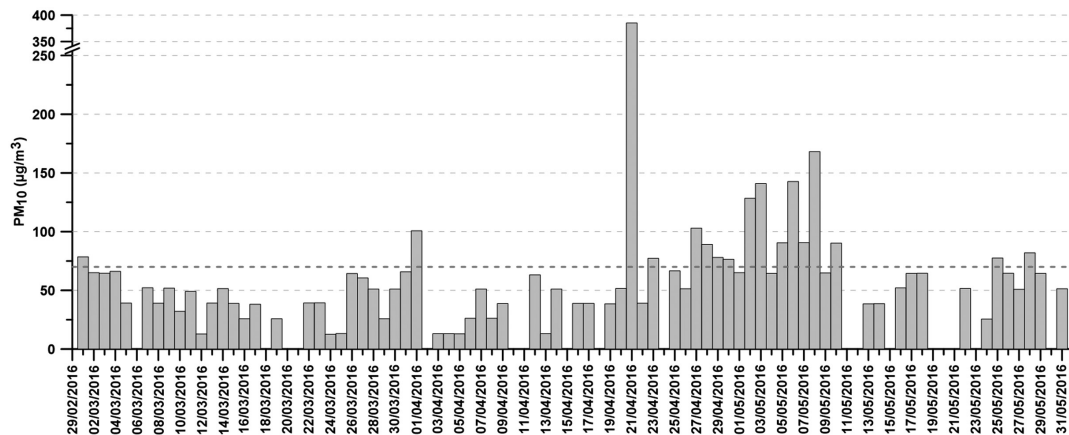
En el caso de la información meteorológica fueron procesadas las variables de interés para identificar las condiciones atmosféricas que estuvieron presentes durante el período de muestreo, lo cual fue complementado con los boletines meteorológicos emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA).

## Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del monitoreo de partículas  $\text{PM}_{10}$  en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, en los años 2016, 2019, 2023 y 2024, lo cual ha permitido identificar la forma en la que ha evolucionado la problemática ambiental en los últimos años.

### Año 2016

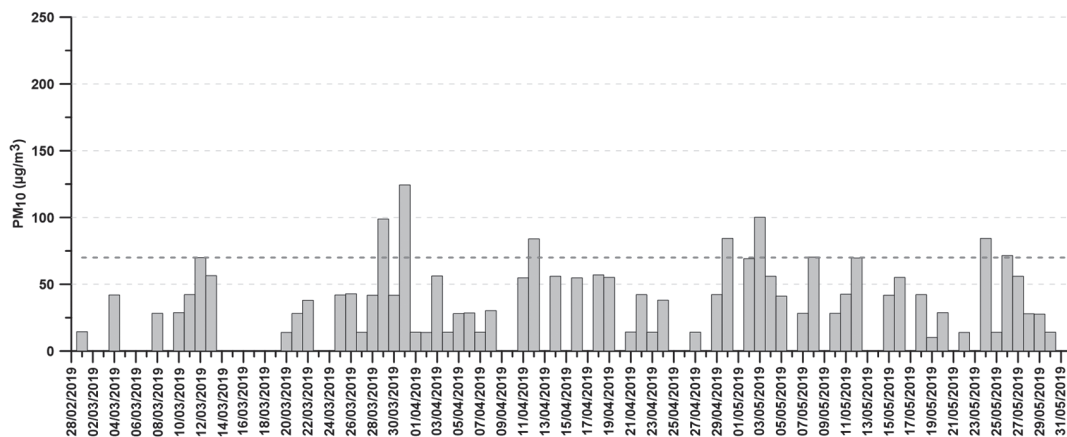
En el 2016, el equipo de muestreo se colocó en las instalaciones del Palacio Municipal de Tuxtla Gutiérrez localizado en el centro de la ciudad (figura 1). Durante el período de marzo a mayo se sobrepasó el LMP en 17 ocasiones (figura 2), lo cual ocurrió con mayor frecuencia a finales de abril y principios de mayo principalmente. La concentración más alta se presentó en el mes de abril ( $385\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). De acuerdo con SMN-CONAGUA (2016), durante los días en los que se presentaron los eventos de contaminación se tuvo la influencia de sistemas de alta presión en la región; con base en ello, Díaz-Valencia (2017) argumenta que dichos eventos se observaron en días con estabilidad atmosférica estable caracterizada por altas temperaturas y velocidades de viento bajas, sumado a la presencia de incendios en los alrededores de la ciudad, así como a la quema de predios a su interior.



**Figura 2.** Serie de tiempo de concentraciones de partículas  $\text{PM}_{10}$  durante el período marzo-mayo 2016. Línea punteada en color rojo señala el LMP establecido en la NOM-025-SSA1-2021.

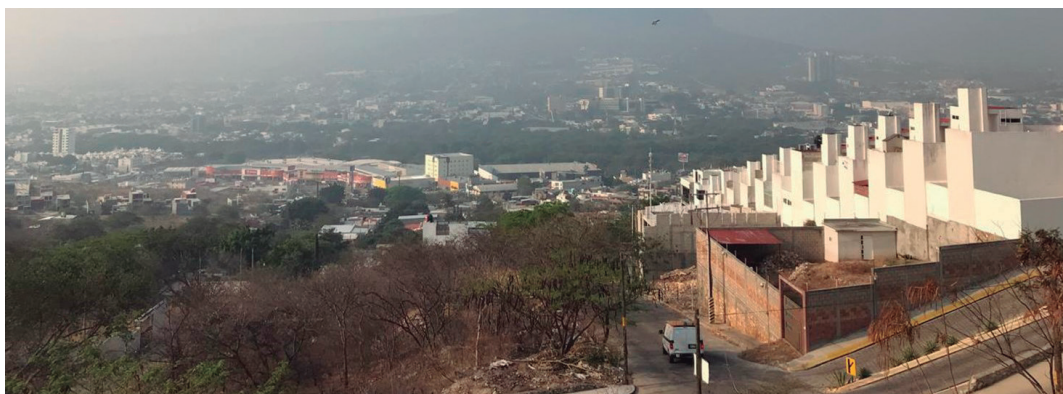
### Año 2019

En el 2019, los resultados indican que se alcanzó el LMP en cuatro ocasiones y se estuvo por arriba de este en seis más (figura 3). Los eventos que se presentaron a finales de marzo, pudieron estar relacionados a la presencia de surada y el efecto de un frente frío sobre la región. La concentración más alta se obtuvo el día 31 de marzo ( $124\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figura 3.** Serie de tiempo de concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> durante el período marzo-mayo 2019. Línea punteada en color rojo señala el LMP establecido en la NOM-025-SSA1-2021.

Para los eventos observados a finales de abril y principios de mayo, el SMN-CONAGUA (2019) reportó la influencia de una circulación anticiclónica en gran parte del país y, en consecuencia, una onda de calor con temperaturas calurosas a muy calurosas. Lo anterior favoreció el estancamiento de las masas de aire que, en combinación con la presencia de incendios en los alrededores de la ciudad, generaron la acumulación de humo en la región (figura 4). Es de señalar que, durante el trabajo de laboratorio en el pesaje de muestras se tuvieron problemas con algunos filtros, los cuales se rompían y representaban pérdida de material, por lo que los eventos observados pudieron haber sido más números o bien, más severos, tal como lo señala Álvarez (2019).

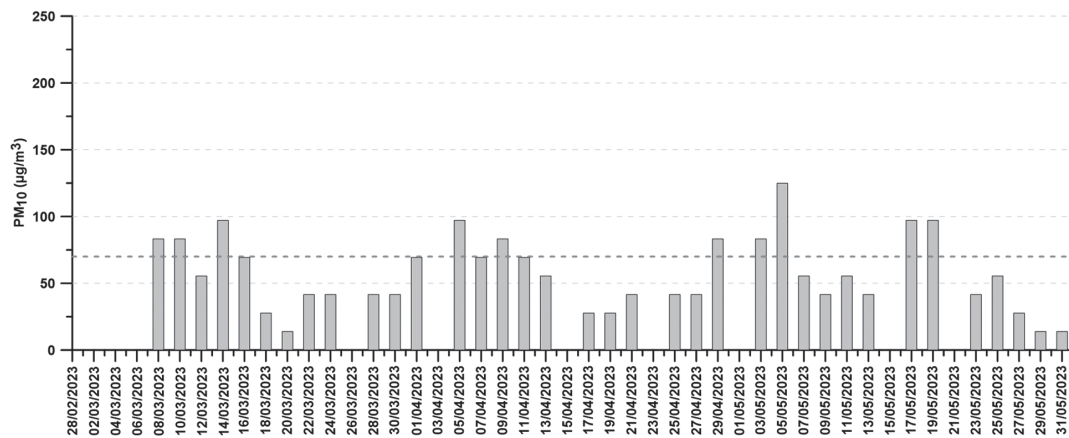


**Figura 4.** Acumulación de humo sobre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez el día 30 de abril del 2019.

### Año 2023

Condiciones de inestabilidad atmosférica se observaron durante el mes de marzo del 2023, lo cual, sumado a ambientes secos y suelos desprovistos de vegetación, pudieron influir en la calidad del aire de la ciudad. Por otro lado, se tuvo la presencia de sistemas anticiclónicos durante abril y mayo, lo cual favoreció condiciones de atmósferas estables que se caracterizan por ambientes cálidos, secos y vientos de baja intensidad (SMN-CONAGUA, 2023). Las condiciones meteorológicas que caracterizan a estos fenómenos, influyeron en la emisión, transporte y dispersión de los contaminantes provenientes de quemas e incendios que afectaron considerablemente la calidad del aire de la ciudad durante la temporada de estiaje.

Para este año, el monitoreo se realizó en las instalaciones del IIGERCC (tabla 1 y figura 1). Las concentraciones de partículas  $PM_{10}$  durante el período de muestreo se presentan en la figura 5. Se observa que el LMP se superó 10 veces durante el período comprendido del 8 de marzo al 01 de junio del 2023, presentándose la concentración más alta el día 5 de mayo ( $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Por otro lado, se presentaron cuatro días en los que la concentración obtenida casi igualó el máximo permisible.



**Figura 5.** Serie de tiempo de concentraciones de partículas  $PM_{10}$  durante el período marzo-mayo 2023. Línea punteada en color rojo señala el LMP establecido en la NOM-025-SSA1-2021.

Las altas concentraciones que se observaron del 8 al 16 de marzo se pueden atribuir a la influencia de los vientos que se presentaron durante esos días, los cuales, al interactuar con suelos desprovistos de vegetación, favorecieron la resuspensión de partículas. Lo anterior resulta de interés al considerar la cercanía del sitio de monitoreo a calles sin pavimentar o áreas de extracción de material pétreo, los cuales pudieron influir sobre la calidad del aire en la zona norte de la ciudad. Además de ello, debido a las quemas que se presentaron durante ese mes, no se descarta la aportación de esas fuentes.

Del 1° al 11 de abril se tuvo la influencia de un sistema anticiclónico sobre el sureste de México, lo cual, conjugado con la presencia de quemas de predios, afectaron la calidad del aire de la ciudad (figura 5). A finales de abril y principios de mayo se obtuvieron concentraciones

por arriba del LMP, el día 5 de mayo se reportó la concentración más alta de todo el período de estudio ( $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Lo anterior fue resultado de las condiciones de estabilidad atmosférica favorecidas por el sistema anticiclónico sobre la región, las cuales, conjugadas con los incendios que se presentaron en Chiapas, favorecieron nuevamente la acumulación de humo en la ciudad.

Del 17 al 19 de mayo, de manera similar, se presentaron condiciones de una atmósfera estable por la presencia de un sistema anticiclónico que, conjugado con los incendios en la entidad, provocaron altas concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  (figura 5). Los resultados anteriores coincidieron con las declaratorias de pre-contingencia y contingencia ambiental por parte de la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (Chamé, 2023; SEMAHN, 2023).

### **Año 2024**

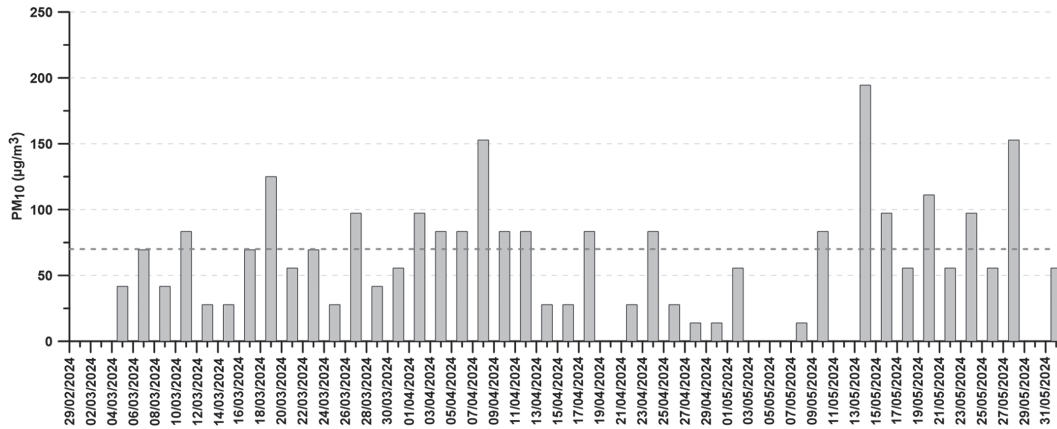
Para esta temporada, el monitoreo se realizó en las instalaciones de la Escuela Telesecundaria 263 "Dr. Manuel Velasco Suárez" localizada en la parte norte de la ciudad (tabla 1 y figura 1).

Las concentraciones de partículas  $\text{PM}_{10}$  durante el período de muestreo se presentan en la figura 6. Se observa que el LMP se superó 17 veces durante el período comprendido del 5 de marzo al 1 de junio del 2024, presentándose la concentración más alta ( $194 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) el día 14 de mayo. Por otro lado, las concentraciones bajas se encuentran en un rango de 14 a  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como resultado de las condiciones meteorológicas que se presentaron.

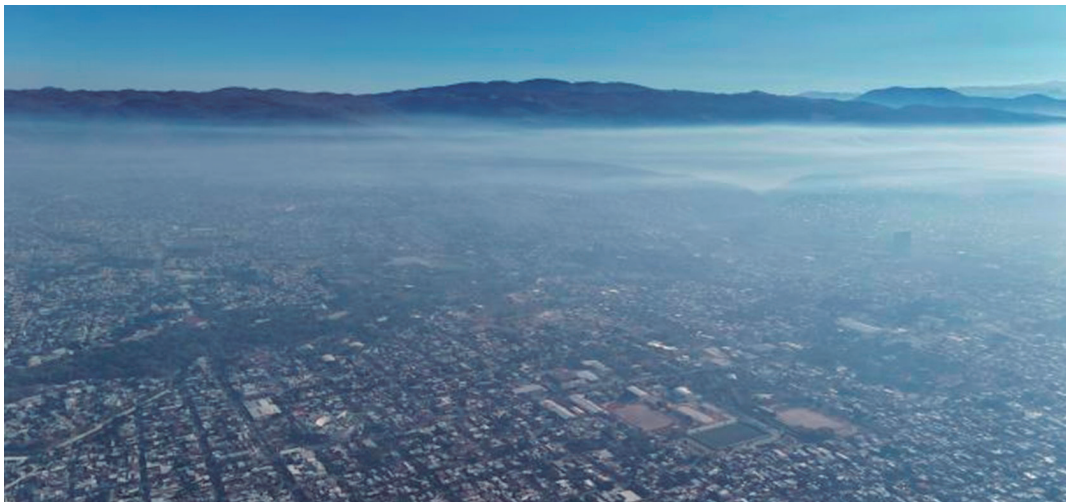
De acuerdo a SMN-CONAGUA (2024), la segunda semana de marzo se tuvo la influencia de un frente frío, por lo que las concentraciones obtenidas el día 11 de marzo se pueden atribuir a la influencia de los vientos que se presentaron durante ese día. Lo anterior resulta de interés al considerar la cercanía del sitio de monitoreo a calles sin pavimentar y/o predios en procesos de lotificación ubicados viento arriba del punto de medición, los cuales pudieron influir sobre la calidad del aire en la zona.

El 19 de marzo se sobrepasó el LMP con una concentración de  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (figura 6); de acuerdo a SMN-CONAGUA (2024), ese mismo día se presentó un evento norte en el sureste de México por lo que, similar al evento observado días previos, el escenario de contaminación se puede atribuir a la influencia de los vientos que se presentaron en la región sobre calles sin pavimentar o predios desprovistos de vegetación.

Como resultado de los incendios que se presentaron en los alrededores de la ciudad, así como de la presencia de un sistema anticiclónico sobre la región que favoreció vientos de baja intensidad y altas temperaturas (SMN-CONAGUA, 2024), la ciudad se llenó de humo a finales de marzo; sin embargo, acorde a los resultados de la figura 6, solo el día 27 de marzo se obtuvo una concentración por arriba del LMP ( $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) como consecuencia de los incendios reportados en zonas del municipio de San Fernando y el Cerro Mactumatzá (Alerta Chiapas, 2024), condición que se observa en la figura 7.



**Figura 6.** Serie de tiempo de concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> durante el período marzo-mayo 2024. Línea punteada en color rojo señala el LMP establecido en la NOM-025-SSA1-2021.



**Figura 7.** Acumulación de humo sobre la ciudad de Tuxtla Gutiérrez el día 27 de marzo del 2024. Tomada de Alerta Chiapas (2024).

En las primeras semanas de abril, la región experimentó la influencia de diferentes fenómenos meteorológicos a mencionar: suradas, frente frío y sistemas anticiclónicos (SMN-CONAGUA, 2024); mismos que ocasionaron variaciones en temperaturas y en la velocidad de vientos. Como consecuencia, las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> estuvieron por arriba del LMP del 2 al 12 de abril (figura 6); la concentración más alta se observó el 8 de abril (153 µg/m<sup>3</sup>).

Del 18 al 26 de abril la ciudad estuvo cubierta de humo (SEMAHN, 2024); sin embargo, los resultados del monitoreo realizado al norte de la ciudad indicaron que el máximo permisible fue superado solamente los días 18 y 24 de abril (83µg/m<sup>3</sup>). De manera similar, la ciudad se volvió a cubrir de humo del 10 al 16 de mayo por lo que las concentraciones de partículas PM10 estuvieron por arriba del LMP (figura 6); el día 14 se obtuvo la concentración más alta (194 µg/m<sup>3</sup>) de todo el período de muestreo. Cabe señalar que no se tiene información del día 12 de mayo,



pero la tendencia sugiere que ese día también se estuvo por arriba del máximo permisible. Estos eventos fueron favorecidos por la presencia de un sistema anticiclónico en la región (SMN-CO-NAGUA, 2024), presentándose días con altas temperaturas y vientos de baja intensidad.

De acuerdo con SMN-CONAGUA (2024), a partir del 20 de mayo dio inicio la tercera ola de calor en México, misma que ocasionó ambiente muy caluroso y una atmósfera estable en la región con vientos de baja intensidad. Lo anterior, conjugado con los incendios reportados en Chiapas, provocaron escenarios de altas concentraciones de partículas. El LMP fue rebasado los días 20, 24 y 28 de mayo; el día 28 se obtuvo la concentración más alta (153 µg/m<sup>3</sup>).

Finalmente, en la tabla 2 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en cada uno de los monitoreos realizados. Se observa que en el 2016 se tuvieron la concentración máxima y el promedio más altos en comparación con los demás años. Las concentraciones de PM<sub>10</sub> más altas se observaron en el 2016, así como en el 2024, mientras que las más bajas se reportaron en el 2019. Por otro lado, los días con altas concentraciones fueron más frecuentes en el 2024, año en el que se sobrepasó el LMP en casi el 50% de los días en que se realizó el monitoreo. Lo anterior resulta de gran relevancia al considerar la ubicación de los sitios en los que se instalaron los equipos en cada uno de los años, lo cual daría indicios sobre la influencia de la geomorfología sobre el comportamiento de los flujos de viento en la región que podría influir en la distribución de los contaminantes. Los resultados coinciden con lo expuesto por Ramírez-Sánchez y Fajardo-Montiel (2023) quienes mencionan que en el caso de las ciudades cuya población se encuentra entre 500,000 a 1'000,000 de habitantes, las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> están por arriba de la normatividad ambiental en un rango del 2 al 55% de los días, lo que representa riesgo para la salud de la población.

Tabla 2. Síntesis de la información de los monitoreos realizados.

Año	Días monitoreados*	Días por arriba o iguales al LMP	Concentración promedio (±d.e.)* (µg/m <sup>3</sup> )	Concentración máxima (µg/m <sup>3</sup> )
2016	74	17	61 (±49)	385
2019	60	10	42.9 (±25.3)	124
2023	36	10	57 (±27.5)	125
2024	40	17	60 (±40.5)	194

\*Considera solamente los días con monitoreo o con información válida.

## Conclusiones

Con base en las condiciones atmosféricas, se observa que los escenarios de altas concentraciones se presentaron bajo la influencia de condiciones de inestabilidad atmosférica promovida por frentes fríos y, en su mayoría, por condiciones estables generadas por la influencia de sistemas anticiclónicos presentes durante el período marzo-mayo en los diferentes años. Los eventos que se presentaron bajo atmósferas inestables, son escenarios aislados y pueden ser asociadas a fuentes como bancos de extracción de materiales, calles sin pavimentar, construcciones y predios en proceso de lotificación.

De acuerdo con la concentración del contaminante y a la frecuencia del evento, los escenarios de contaminación que se presentaron en condiciones de atmósferas estables fueron los más severos, además de presentar una periodicidad definida. Lo anterior es ocasionado por la acumulación de humo en la ciudad generado por la presencia de quemas e incendios forestales en la entidad. Además, no se descarta la aportación que pudiesen tener otras fuentes como la preparación de alimentos, la quema de basura, las emisiones vehiculares, entre otras, que suman a la problemática ambiental en la entidad.

Al considerar el objetivo y los alcances del presente trabajo, resalta la necesidad de realizar un análisis más completo en conjunto con las variables meteorológicas, las cuales, sumado a la caracterización de partículas y aplicación de modelos computacionales, permitirían identificar con mayor certeza las principales fuentes de emisión de partículas que afectan la calidad del aire en la entidad.

Todo lo anterior resalta la importancia del diseño y la implementación de la red de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, así como en la zona metropolitana de esta, para la adecuada gestión de la calidad del aire.

## Agradecimientos

Parte de esta investigación fue realizada gracias al financiamiento del Programa presupuestario F003 (2022-2023). Programas nacionales estratégicos de ciencia y tecnología y vinculación con los sectores social, público y privado del CONAHCYT. Proyecto 321911. Fortalecimiento de la infraestructura y capacidades analíticas del Laboratorio de Salud y Ambiente de la UNICACH para la colaboración interinstitucional en propuestas de los PRONACES en el Sur-Sureste de México.

Los autores agradecen el apoyo del Gobierno Municipal de Tuxtla Gutiérrez en las administraciones 2015-2018, 2018-2021 y 2021-2024, así como a la Dirección de la Escuela Telesecundaria 263 "Dr. Manuel Velasco Suárez", por las facilidades otorgadas para la instalación de los equipos utilizados.

De igual manera, se reconoce el apoyo brindado por el Ing. Jesús Ernesto Velázquez López, así como del C. Axel Adrián Estrada Hernández, de la Ing. Laura Lizbeth Sántiz Martínez y de la Ing. Miriam Ramos Franco.

## Bibliografía

- Airmetrics (2020). Minivol TAS Sampler. Operation Manual Rev. 1.2. Recuperado de <http://www.airmetrics.com/products/minivol/index.html>
- Alerta Chiapas (2024). *Extremadamente mala la calidad del aire en zona Metropolitana*. Disponible en: <https://alertachiapas.com/2024/03/27/extremadamente-mala-la-calidad-del-aire-en-zona-metropolitana/>
- Álvarez, S. (2019). *Pésima calidad del aire en Tuxtla, incluso por arriba que la Ciudad de México*. *El Heraldo de Chiapas*. <https://www.elheraldodechiapas.com.mx/local/pesima-calidad-del-aire-en-tuxtla-incluso-por-arriba-que-la-ciudad-de-mexico-3422787.html>
- Aragón-Piña, A. (2011). *¿Cómo son las partículas atmosféricas antropogénicas y cuál es su relación con los diversos tipos de fuentes contaminantes?* Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2024). 1° de abril. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Cárdenas-Moreno, P. R., Moreno-Torres, L. R., Lovallo, M., Telesca, L. y Ramírez-Rojas, A. (2021). Spectral, multifractal and informational analysis of PM<sub>10</sub> time series measured in Mexico City Metropolitan Area. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 565, 125545.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2024). Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF). <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas (CEIEG). (2024). Mapas temáticos. Perfiles municipales. <http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/perfiles/Inicio>
- Chamé, A. (2023). *Contingencia Ambiental en Chiapas, la primera de su historia*. Disponible en: <https://www.tvazteca.com/aztecanoticias/contingencia-ambiental-chiapas-la-prime-ra-su-historia>
- Dai, X., Liu, H., Chen, D. y Zhang, J. (2018). Association between ambient particulate matter concentrations and hospitalization for ischemic heart disease (I20-I25, ICD-10) in China: A multicity case-crossover study. *Atmospheric Environment*, 186, 129-135.
- Díaz-Nigenda, E., Tatarko, J., Morales-Iglesias, H., Hernández, Z., Vázquez, W. y Alatorre-Ibar-güengoitia, M. (2018). Measurement and Modeling Air Quality Impacts of Dust Emissions from Unpaved Roads in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Geosciences*, 8, 284-300. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080284>
- Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Venegas-Sandoval, A., Morales-Iglesias, H. y Hernández-Jiménez, S. (2021). Emisiones generadas por el consumo de leña y carbón en la preparación de comida rápida. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2), e2962. DOI:10.19136/era.a8n2.2962
- Díaz-Valencia, S. E. (2017). *Estudio del comportamiento de las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez durante la temporada de estiaje*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Luong, L. M., Phung, D., Sly, P. D., Morawska, L. y Thai, P. K. (2017). The association between particulate air pollution and respiratory admissions among young children in Hanoi, Vietnam. *Science of the total environment*, 578, 249-255.
- Fonseca-Hernández, M., Tereshchenko, I., Mayor, Y.G., Figueroa-Montaño, A., Cuesta-Santos, O. y Monzón, C. (2018). Atmospheric Pollution by PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub> in the Guadalajara Metropolitan Area, Mexico. *Atmosphere*, 9, 243.
- Morales-Iglesias, H., Priego, S.A.G. y Bollo, M.M. (2017). Los paisajes físico-geográficos del estado de Chiapas, México a escala 1: 250 000. *Terra Digitalis, international e-journal of map*, 1, 1-7.
- NOM-025-SSA1-2021. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de octubre de 2021.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. 2022. *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(out-door\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(out-door)-air-quality-and-health)

- Organización Mundial de la Salud [OMS]. 2023. *Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)*. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)#:~:text=En%20las%20personas%20con%20EPOC,sufrir%20otros%20problemas%20de%20salud](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)#:~:text=En%20las%20personas%20con%20EPOC,sufrir%20otros%20problemas%20de%20salud)
- Priyankara, S., Senarathna, M., Jayaratne, R., Morawska, L., Abeysundara, S., Weerasooriya, R., Knibbs, L.D., Dharmage, S.C., Yasaratne, D. y Bowatte, G. (2021). Ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> exposure and respiratory disease hospitalization in Kandy, Sri Lanka. *International journal of environmental research and public health*, 18(18), 9617.
- Ramírez-Sánchez, H. U. y Fajardo-Montiel, A. L. (2023). Air Pollution in Medium-Sized Mexican Cities. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 22(3), 1-15.
- Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural [SEMAHN]. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del estado de Chiapas (ProAire)*. Gobierno del estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 140 págs.
- Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural [SEMAHN]. (2022). *Programa Estatal de Cambio Climático de Chiapas (Actualización 2022)*. Gobierno del estado de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 319 págs.
- Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural [SEMAHN]. (2023). *Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire*. [https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad\\_aire](https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad_aire)
- Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua [SMN-CONAGUA]. (2016). *Pronóstico Meteorológico General*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/pronostico-meteorologico-general>
- Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua [SMN-CONAGUA]. (2019). *Pronóstico Meteorológico General*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/pronostico-meteorologico-general>
- Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua [SMN-CONAGUA]. (2023). *Pronóstico Meteorológico General*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/pronostico-meteorologico-general>
- Servicio Meteorológico Nacional - Comisión Nacional del Agua [SMN-CONAGUA]. (2024). *Pronóstico Meteorológico General*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/pronostico-meteorologico-general>
- Ubilla, C. y Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118.
- Vaduganathan, M., De Palma, G., Manerba, A., Goldoni, M., Triggiani, M., Apostoli, P., Dei Cas L. y Nodari, S. (2016). Risk of cardiovascular hospitalizations from exposure to coarse particulate matter (PM<sub>10</sub>) below the European Union safety threshold. *The American journal of cardiology*, 117(8), 1231-1235.
- Yanagi, Y., Assunção, J. V. D. y Barrozo, L. V. (2012). The impact of atmospheric particulate matter on cancer incidence and mortality in the city of São Paulo, Brazil. *Cadernos de saude publica*, 28, 1737-1748.
- Zhou, Y., Li, L. y Hu, L. (2017). Correlation analysis of PM<sub>10</sub> and the incidence of lung cancer in Nanchang, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1253.

## Semblanzas

### **Andrea Venegas Sandoval**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
andrea.venegas@unicach.mx

Es profesora investigadora de tiempo completo adscrita al Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGERCC) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Cuenta con el reconocimiento a Perfil Deseable (PRODEP-SEP) y forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores - Nivel 1. Forma parte del Cuerpo Académico consolidado de Cambio Climático y Contaminación Atmosférica, con el cual desarrolla la línea de investigación Adaptación y Mitigación al Cambio Climático. En colaboración con los integrantes del Cuerpo Académico han contribuido a la elaboración del Inventario de Gases de Efecto Invernadero del Programa de Acción ante el Cambio Climático de Chiapas (2010) y en la actualización de este (2013). Es autora y coautora de siete artículos científicos publicados en revistas indexadas.

Ha contribuido a la formación de capital humano en los temas de sustentabilidad y cambio climático, mediante la impartición de clases a nivel de licenciatura y posgrado. Asimismo, ha participado en la dirección, codirección y asesoría de trabajos recepcionales. Ha dirigido alrededor de diez trabajos de tesis de Licenciatura y cuatro de Maestría en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, programa integrante del Sistema Nacional de Posgrados de Calidad del CONAHCyT. Actualmente desarrolla el proyecto de investigación: "Adaptación y resiliencia socioecológica de sistemas cafetaleros de Chiapas, en el contexto de Cambio Climático".

### **Angel Figueroa Soto**

CONAHCyT - Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo  
angfsoto@gmail.com

Es Físico egresado de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP; Maestro y Doctor en Ciencias de la Tierra por la UNAM con orientación en sismología. Actualmente es Investigador por México comisionado al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y desarrolló su trabajo de estancia sabática en el IPN-CIIDIR Unidad Oaxaca en la implementación de metodologías sísmicas para el reconocimiento del acuífero Valles Centrales de Oaxaca. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores - nivel 1. Ha impartido cursos, talleres y conferencias en diversas áreas de las geociencias. Desde el 2016 y hasta la fecha ha dirigido tesis licenciatura y maestría en diversas áreas de geofísica y sismología.

### **Angel Emmanuel Zúñiga Tovar**

CONAHCYT – Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México  
ezuniga@geografia.unam.mx

Es Licenciado en Geografía por la Facultad de Filosofía y Letras; Maestro en Ciencias por el Instituto de Geofísica y Doctor en Ciencias por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, todas de la UNAM. También es Especialista en Gestión Integral de Riesgos de Desastres por la Escuela de Administración Pública del Distrito Federal; Especialista en Análisis y Gestión de Riesgos por Avenidas e Inundaciones por la Facultad de Medio Ambiente de la Universidad de Castilla La Mancha, España. Es Técnico en Gestión Integral de Riesgos por la Escuela Nacional de Protección Civil del Centro Nacional de Prevención de Desastres. Actualmente, es Investigador CONAHCYT comisionado al Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra del Instituto de Geografía de la UNAM. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del CONAHCYT. Ha publicado más de 10 artículos de investigación, 4 capítulos de libro, un libro, 3 mapas y dos visualizadores web sobre desastres. Ha participado en 12 proyectos de investigación. Participa como director de tesis y docente a nivel licenciatura y posgrado. Participó como Co-Editor en la revista Ciencia y Naturaleza; como Miembro del Comité Científico Asesor para el establecimiento de una NOM para SEDATU; y como Coordinador del Diplomado en Geomática del Instituto de Geografía de la UNAM. Ha presentado sus trabajos en diferentes espacios de difusión. Es revisor y dictaminador de más de 30 productos científicos nacionales e internacionales. Ha sido reconocido como tutor de la mejor tesis en Geografía Física por la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística.

### **Antonio Saldívar Moreno**

Departamento de Sociedad y Cultura de El Colegio de la Frontera Sur  
asaldivar@ecosur.mx

Geógrafo por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Maestro en Desarrollo Rural por la Universidad Autónoma Chapingo, con una tesis sobre procesos socioeducativos en la Selva Lacandona. Obtuvo su doctorado en Comunicación, Cultura y Educación en la Universidad de Salamanca, España, investigando la vinculación social en la educación superior.

Actualmente, es investigador titular y docente en el grupo académico “Procesos culturales y construcción social de alternativas” del Departamento de Sociedad y Cultura. Su trabajo se enfoca en metodologías participativas y ha publicado extensamente sobre educación, participación social y desarrollo crítico.

Con más de veinte años de experiencia, ha trabajado en zonas indígenas y rurales de México, desarrollando programas de educación intercultural, ambiental y en valores, así como planeación participativa y organización social. Es miembro activo de la Red Comida Sana y Cercana y del Colectivo por una Educación Intercultural, participando en actividades comunitarias y de rescate cultural.

Entre 2020 y 2022, fue director de posgrado en el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT). Actualmente, es director general de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). Sus áreas de especialización incluyen educación intercultural, sistematización y evaluación de procesos educativos, innovación social, participación social y desarrollo comunitario.

**Daniel Alejandro Gallegos Pérez**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

daniel.gallegos@e.unicach.mx

Ingeniero Topógrafo e Hidrólogo de profesión, especialista en “Didáctica de las Matemáticas” (PNPC-CONAHCyT) por la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNACH, maestro en Ciencias en Desarrollo Sustentable por la FI de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Trabajó en la Subdirección de Programación de la CONAGUA durante cinco años, en el área del SIGA (Sistemas de Información Geográfica del Agua) y colaboró en la empresa “DIDESINT SA DE CV” como apoyo técnico en levantamientos fotogramétricos con DRONES. Ha participado como instructor en diversos cursos, diplomados y especialidades; y desde hace 13 años se desempeña como profesor de asignatura en la FI de la UNICACH.

Estudiante de la Maestría en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (MGRYCC) Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

**Diana Estefanía Guzmán Morales**

Posgrado en Geografía - Universidad Nacional Autónoma de México

d.estefania.guzman.m@gmail.com

Cursó la licenciatura en Geografía en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), titulándose con la tesis: “Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de inundaciones en el estado de Chiapas, México, periodo 1970-2016”, bajo la tutoría del Dr. Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar. Con este trabajo se hizo acreedora a la distinción “Isabel Lorenzo Villa” a la mejor tesis de licenciatura en el área de Geografía Física. Participó como ponente en el XXV Congreso Nacional de Geografía con el tema de su tesis. Cursó el Diplomado en Geomática (Ed. XVI), organizado por el Laboratorio de Análisis Geoespacial (LAGE) del Instituto de Geografía de la UNAM. Actualmente, se encuentra estudiando la maestría en Geografía en la UNAM, dándole continuidad al estudio de las inundaciones urbanas. Actualmente, participa en el programa académico Técnico Básico en Gestión Integral del Riesgo en la Escuela Nacional de Protección Civil (ENAPROC).

**Emmanuel Díaz Nigenda**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

emmanuel.diaz@unicach.mx

Es Ingeniero Químico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez; realizó sus estudios de posgrado en la Universidad Nacional Autónoma de México, en la que obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería en el campo de conocimiento “Ambiental” y posteriormente, el grado de Doctor en Ciencias de la Tierra en el área de físicoquímica atmosférica. A partir de su incorporación al Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGERCC) de la Universi-

dad de Ciencias y Artes de Chiapas, comienza a trabajar en temas relacionados a la elaboración de inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminación atmosférica. Con base en sus áreas de interés, ha desarrollado proyectos relacionados a la cuantificación de emisiones de GEI y otros contaminantes, así como al monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

Actualmente forma parte del Cuerpo Académico "Cambio Climático y Contaminación Atmosférica" adscrito al IIGERCC.

### **Francisco Castellanos León**

Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca  
fcastellanos@ipn.mx

Francisco Castellanos es Ingeniero Civil egresado del Instituto Tecnológico de Oaxaca; Maestro y Doctor en Ingeniería con especialidad de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNAM con orientación en dinámica estructural, ingeniería sísmica y sismología. Actualmente es Investigador del Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1 del CONAHCyT y es coordinador de sede del Doctorado en Ciencia y Tecnología de Ingeniería Civil, Materiales y Mecánica Computacional, impartido por el CIIDIR Oaxaca y la ESIA Unidad Zacatenco.

### **Gabriela Narcizo de Lima**

Departamento de Geografía de la Facultad de Letras - Universidad de Oporto - Portugal.  
gabrielanl@gmail.com

Doctora en Ciencias (Geografía Física) por la Universidad de Sao Paulo (USP) - Brasil, con maestría y licenciatura en Geografía por la Universidad Estatal de São Paulo "Julio de Mesquita Filho" (UNESP) - Brasil. Entre 2016 y 2018, Gabriela realizó dos estancias de investigación postdoctoral en el Departamento de Planificación Territorial y Geoprocesamiento del Instituto de Geociencias y Ciencias Exactas de Rio Claro/Sao Paulo (UNESP) y en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Actualmente, colabora en el proyecto europeo, financiado con fondos de la Iniciativa Horizonte Europa, *Co-creating solutions for soil health in Living Labs* y coordina el proyecto *Impacts and dynamics of the Urban Heat Island in Porto: contributions to urban planning through the development of future scenarios*, financiado por la Fundación de Ciencia y Tecnología de Portugal. Sus principales líneas de investigación incluyen los impactos de las actividades antropogénicas en el clima a diversas escalas, además de enfocarse en temas relacionados con la gestión de recursos hídricos y la planificación del uso del suelo.



**Gisselle Isabeau Ballinas Altamirano**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
gisselle.ballinas@e.unicach.mx

Ingeniera civil por la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). En 2019, recibió la “Beca Tesis Licenciatura” del Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del estado de Chiapas (ICTIECH) dentro del programa “Jóvenes divulgadores del conocimiento” por su investigación “Análisis de mapas de riesgo de fenómenos hidrometeorológicos en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas”.

Recientemente, completó una Maestría en Gestión de Riesgos y Cambio Climático en el Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (IIGERCC-UNICACH). Su proyecto de maestría, “Planeación participativa para el fortalecimiento de la resiliencia ante riesgos climáticos en Tuxtla Gutiérrez: Un análisis de la normatividad vigente y de la percepción de la población”, destaca su enfoque en la gestión del agua y la resiliencia ante los riesgos como las inundaciones.

Sus intereses de investigación incluyen la relación entre el ser humano y su entorno, con énfasis en la gestión del agua y la difusión de información científica.

**Horacio Morales Iglesias**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
horacio.morales@unicach.mx

Licenciado, Maestro y Doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel 1 de CONAHCyT. Como parte de su trayectoria académica, ha sido Profesor-Investigador de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y Asesor Externo en la Dirección General de Ordenamiento Ecológico del Instituto Nacional de Ecología (INE). En Chiapas, ha colaborado con El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) en diversos proyectos sobre Ordenamiento Ecológico y Territorial; en el año 2006, se incorporó a la Escuela de Biología de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) como profesor de asignatura; en 2009 se integra a la planta docente del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la misma universidad, donde ha impartido cursos de licenciatura y maestría; además, ha desarrollado la línea de investigación en Geografía del Paisaje, Geodiversidad y Riesgo en Chiapas. Es autor y coautor de artículos científicos y capítulos de libro sobre temas del paisaje físico-geográfico aplicado a la planificación territorial. También ha dirigido tesis de licenciatura y posgrado.

### **José Francisco Pinto Castillo**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgo y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

jose.pinto@unicach.mx

Licenciado en Informática. Cursó una maestría en administración y el Doctorado en Desarrollo Educativo. Miembro del Sistema Estatal de Investigadores a partir del 2023. Se ha especializado en sistemas de información geográfica y análisis espacial, procesos educativos y desarrollo de materiales lúdicos para la enseñanza de ciencias de la tierra. Ha participado en diversos proyectos financiados por CONAHCYT e instituciones internacionales en temas como: análisis espacial, sistemas de información geográfica y modelación de riesgos, conjuntamente con el grupo *The Vulnerability and Risk Analysis & Mapping* (VRAM) de la OMS, modelación de amenazas naturales y biológicas en escenarios de cambio climático dentro del Centro Regional de Investigación en Salud Pública, Tapachula Chiapas. Co-autor del libro E-atlas para los riesgos de desastres, aplicación a México, metodologías y procesos de implementación, publicado por Códice Roseta. Ha participado como colaborador en diversos artículos científicos y capítulos de libros. Entusiasta de la Divulgación de la Ciencia, ha realizado diversos proyectos, que han participado en la Feria de Ciencias e Ingenierías organizada por el Instituto de Ciencia y Tecnología del estado de Chiapas, obteniendo el 2do y 3er lugar en la etapa estatal, y su pase a la etapa nacional.

### **Luis Miguel Espinosa Rodríguez**

Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México

lmespinosar@uaemex.mx

Realizó estudios de Licenciatura, Maestría y Doctorado en Geografía en la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde el año 1988 desarrolla actividades docentes en programas académicos de licenciatura, maestría y doctorado y desde 1995 labora como Profesor de Carrera de Tiempo Completo en la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México; colabora en los posgrados de Ciencias Ambientales y en de Urbanismo que tienen sede en las Facultades de Química y de Planeación Urbana y Regional en la UAEMéx. Asimismo, participa con los departamentos de Posgrado de Geografía de la UNAM en los campus de Morelia Michoacán y Ciudad Universitaria en la Ciudad de México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y posee el Reconocimiento Nacional del Programa de Mejoramiento del Profesorado de la Secretaría de Educación Pública.

Ha realizado estancias académicas posdoctorales en el Instituto de Geografía UNAM; en la Escuela Nacional de Educación Superior (ENES) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el campus Morelia en Michoacán; en la División de Estudios Históricos y Humanos/Departamento de Geografía y Ordenamiento Territorial del Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades (CUCSH) de la Universidad de Guadalajara (UdG), y en Instituto Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante, España.

En la Facultad de Geografía de la UAEMéx ha ocupado los cargos de Coordinador de la Licenciatura en Geografía, Coordinador de Planeación y Desarrollo, Coordinador de Extensión y Vinculación, Jefe del Departamento de Servicio Social, Responsable del Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9000-2001 y actualmente La Coordinación de Cooperación Internacional.

### **Marcelino García Benítez**

CONAHCyT - Instituto en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
marcelino.garcia@unicach.mx

Es Licenciado en Geografía por la Facultad de Filosofía y Letras, (UNAM); Maestro en Estudios de Población en el Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades en la (UAEH) y Doctor en Urbanismo por la Facultad de Planeación Urbana y Regional, (UAEMex). Actualmente es Investigador CONAHCyT por México asignado al Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas UNICACH. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores - nivel 1. Ha participado en 9 proyectos de investigación, publicado 8 artículos científicos y/o divulgación, 7 capítulos de libros, 5 libros de divulgación y participado en 15 dictámenes de artículos y proyectos de investigación para distintas instituciones nacionales e internacionales incluidas en el catálogo indexado del CONAHCyT. Ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado, participado en comités tutorales. Impartido cursos, talleres y conferencias aplicadas desde las Líneas de investigación del Riesgo y vulnerabilidad socioambiental urbana a distintas escalas geográficas, Población y medio ambiente, Impacto de fenómenos hidrometeorológicos y/o climáticos y Problemas socioambientales actuales.

### **María del Carmen Gardenia Jiménez Velázquez**

Colegio Mexiquense A. C.  
garvlzqz@gmail.com

Licenciada en Geografía y Maestra en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México; en la Facultad de Geografía defendió la tesis: "Caracterización geomorfológica de Volcán de Fuego de Colima" y en la Facultad de Química desarrolló la investigación: "Análisis geocológico de la cuenca del río Armería, Colima México". Como parte de su trayectoria académica, ha participado en los siguientes eventos: XXIII Congreso Nacional de Geografía, II Simposio Mexicano sobre Geopatrimonio y Geoparques, Reunión Nacional de Geomorfología en las ediciones XI y XII, Congreso de Planeación y Desarrollo Sustentable. También cuenta con experiencia en la obtención y análisis de información censal de INEGI. Actualmente realiza una estancia de investigación en el Colegio Mexiquense A.C. con el proyecto: "Recarga de mantos acuíferos en relación con la antropización de la cobertura vegetal del paisaje en el municipio de Villa Victoria, Estado de México".

### **María Magdalena Velázquez Bucio**

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México

magda\_vb@yahoo.com.mx

Bióloga egresada de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), donde también obtuvo la Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. Realizó su Doctorado en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En 2021 realizó un posdoctorado en la Universidad de Insubria (Como, Italia) con investigación sobre Efectos Sísmico-Ambientales producidos por sismos recientes en México. Posteriormente llevó a cabo una estancia como Investigadora posdoctoral en el Centro de Geociencias, UNAM, Juriquilla. Es parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores.

Su línea de investigación se centra en el análisis de fallas activas en el Cinturón Volcánico Trans-mexicano para obtener un mejor vínculo entre estas y el peligro sísmico asociado, mediante análisis paleosismológicos, incluyendo técnicas estratigráficas y sedimentológicas. También se dedica al análisis de efectos en el ambiente natural generados por sismos históricos y recientes en México. Actualmente promueve la formación del Grupo de Respuesta Rápida Post-Sísmica Nacional.

### **Omar Ávila Flores**

Universidad de la Sierra Sur

afomar\_1@hotmail.com

Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Universidad de la Sierra Sur, adscrito a la Licenciatura en Administración Municipal, es parte del Núcleo Académico Básico de la Maestría en Planeación Estratégica Municipal y de la Maestría en Gobierno Electrónico, es el Coordinador del Cuerpo Académico; "Ciudades, Territorio y Sustentabilidad" del Instituto de Estudios Municipales de la Universidad de la Sierra Sur.

Doctor en Urbanismo por la Universidad Autónoma del Estado de México, Maestro en Estudios de Población por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Licenciado en Geografía y Ordenación del Territorio por la Universidad Autónoma del Estado de México. También ha trabajado como Profesor Investigador de Tiempo Completo del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados de la Población de la Universidad Autónoma del Estado de México, ha fungido como Profesor Invitado en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Perfil Deseable por el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP-SEP) e Investigador Nacional Nivel I por el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores de México (SNII-CONAHCyT).

### **Osías Ruíz Álvarez**

Instituto Nacional Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria  
 ruiz.osias@inifap.gob.mx

Estudió agronomía, al egresar (2007), se incorporó al Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), donde apoyó administrativa y técnicamente a productores de maíz de Tabasco. Durante 2008-2010, estudió la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, con la tesis “Estudio agroclimático, requerimiento de riego y reducción del rendimiento de pastos en Tabasco, México”. En 2011, empezó a trabajar para el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Durante 2015-2019, estudió el doctorado en “Manejo del Agua y Ciencias Hidrológicas”; por medio de una beca del CONAHCyT, tesis *Trends in Hydrometeorological Variables with Consideration of Climate Change in Aguascalientes, México*. Al terminar el doctorado, se incorporó nuevamente al INIFAP. Las disciplinas que trabaja son: manejo del agua con fines agrícolas, climatología y meteorología agrícola, series de tiempo en climatología agrícola, eventos de precipitación y temperatura extremas, manejo integrado de cuencas hidrográficas y agricultura de conservación; en las cuales hace uso de la estadística, bases de datos de clima y Sistemas de Información Geográficos. Actualmente está interesado en estudiar cómo el clima futuro, podría influir en la productividad de los cultivos; cada año realiza un pronóstico de precipitación para que los agricultores tomen decisiones relacionadas con el ciclo Primavera Verano. Sus objetivos son aplicar de manera práctica los conocimientos técnicos adquiridos en su formación académica, y de textos científicos; entre los que destacan la estadística, hidrología y los Sistemas de Información Geográficos. Ruíz Álvarez es una persona innovadora y de retos, consistente y de actualización constante para poder contribuir en la solución de la problemática de México.

### **Rebeca Isabel Martínez Salinas**

Facultad de Ingeniería, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
 rebeca.martinez@unicach.mx

Es Químico Farmacobiólogo de formación básica. Obtuvo el grado de Doctorado en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en el área de Salud Ambiental Integral del Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales (2012). Realizó su estancia posdoctoral en el Centro público de investigación el Colegio de la Frontera Sur, Unidad San Cristóbal de las Casas, Chiapas (2011-2012). Desde septiembre del año 2012 se desempeña como profesora e investigadora en los programas educativos de licenciatura (Ingeniería ambiental) y posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (Desarrollo sustentable y gestión de riesgos; Salud pública y sustentabilidad). Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras con Nivel I (2013-2026), ha sido integrante del Sistema Estatal de Investigadores de Chiapas Nivel III-Honorífico (2013-2019) y del Registro de CONAHCyT de evaluadores acreditados (2013-2024). Cuenta con el Reconocimiento de Perfil deseable del Programa de Mejoramiento del Profesorado de la Secretaría de Educación Pública (2013-2024). Colabora con el Cuerpo Académico Consolidado ante el PRODEP - Estu-

dios Ambientales con la línea de investigación en Ingeniería Ambiental. Durante los años 2014 y 2015 mediante proyecto de infraestructura del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología creó el Laboratorio Académico y de Investigación en Toxicología y Salud Ambiental (LAITSA) de la Facultad de Ingeniería, espacio en el que ha formado recursos humanos de nivel licenciatura y posgrado. Actualmente desarrolla proyectos relacionados con la temática de calidad del agua, bioensayos de toxicidad por la exposición a contaminantes y en la evaluación de tratamientos aplicados en aguas residuales, colabora con proyectos para el monitoreo de calidad del aire, monitoreo de metales pesados en muestras biológicas y ambientales, evaluación de riesgos en salud, comunicación ambiental, entre otros. Su área de interés en la investigación es la Evaluación de Riesgos Ambientales y de Salud en escenarios de exposición a contaminantes con énfasis en la Toxicología ambiental

### **Rosa Isabel Hernández Sánchez**

CONAHCyT – Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca  
rihernandezs@ipn.mx

Hernández Sánchez es Ingeniero Químico egresado del Instituto Tecnológico de Oaxaca; Maestra y Doctora en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales por el CIIDIR Unidad Oaxaca. Actualmente es Investigadora por México comisionada al Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Oaxaca. Ha impartido cursos, talleres y conferencias en la línea de Ingeniería de los posgrados del CIIDIR-Oaxaca.

### **Salvador Adame Martínez**

Facultad de Planeación Urbana y Regional - Universidad Autónoma del Estado de México  
sadamem@uaemex.mx

Geógrafo por la UNAM, Maestría y Doctorado en Ciencias por el Colegio de Postgraduados (COL-POS). Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT). Reconocimiento Perfil Deseable del Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). Líneas de investigación: Sustentabilidad Urbana, Riesgo y Vulnerabilidad, y Variabilidad Climática. Director de Tesis de 74 alumnos de licenciatura, maestría y doctorado; publicación de 48 artículos y 56 capítulos de libros, como autor y coautor; participación en 60 eventos académicos a nivel nacional e internacional e impartición de 80 cursos académicos. Estancia de investigación en el Instituto de Geografía de la UNAM. Pertenece al Cuerpo Académico Relaciones Metrópoli - Ambiente (SEP-UAEM), miembro de la Red Internacional "Territorios, sustentabilidad y gobernanza en México y Polonia (RETESyG)" de la UAEM; Red PRODEP/SEP "Desarrollo Urbano y Sustentabilidad" y de la "Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (RedesClim)" del CONAHCyT.

Profesor-Investigador de tiempo completo en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Planeación Territorial (Ceplat) perteneciente a la Facultad de Planeación Urbana y Regional (FaPUR) de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Salvador Isidro Belmonte Jiménez**

Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR Unidad Oaxaca  
 sjimenez@ipn.mx

Belmonte Jiménez es Ingeniero Geofísico egresado de la ESIA-IPN, Maestro en geofísica aplicada por el CICESE y Doctor en Ciencias de la Tierra por la UNAM. Trabaja en temas de monitoreo y caracterización de agua subterránea utilizando diversas áreas del conocimiento de las Ciencias de la Tierra como geofísica, geohidrología, percepción remota, entre otras. Ha desarrollado proyectos para evaluar el impacto de obras de recarga al sistema acuífero en comunidades del valle de Ocotlán. Actualmente estudia el sistema acuífero en los Valles Centrales de Oaxaca realizando mediciones gravimétricas para determinar las variaciones del almacenamiento de agua subterránea, así como la implementación de metodologías sísmicas para el reconocimiento del medio geológico. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores - nivel 1. Participó en la elaboración y diseño del "Doctorado en Ciencia y Tecnología de Ingeniería Civil, Materiales y Mecánica Computacional" impartido por esta unidad de adscripción y la ESIA Zacantenco. Ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado en áreas de ciencias de la Tierra. Fue director del CIIDIR Oaxaca de enero de 2016 a octubre de 2023.

**Suhaila Elizabeth Díaz Valencia**

Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México  
 suhailae.dvse@gmail.com

Egresó como licenciada en Ciencias de la Tierra por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) y como maestra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Autónoma de México (UNAM). Laboró en la Comisión Estatal del Agua de Morelos (CEAGUA Morelos) en la supervisión de plantas de tratamiento de aguas residuales de dicho estado, así como en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en proyectos relacionados a la mejora de la calidad del agua de lagos y embalses. Cuenta con experiencia en la evaluación de la calidad del aire por partículas PM<sub>10</sub>; así como de la evaluación y modelación de cargas contaminantes a cuerpos de agua. Cuenta con tres artículos publicados y ha participado con ponencias en congresos nacionales e internacionales. Actualmente, se encuentra realizando sus estudios de doctorado en Ciencias de la Tierra en la UNAM, profundizando en los procesos de atenuación natural que definen el destino ambiental de contaminantes en el suelo, y dentro del cual realizó una estancia en el *Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement* (INRAE), en Francia, en el que apoyó en experimentos de columnas para evaluar el transporte de agua en el suelo y se capacitó en el uso del modelo VSoil para el transporte de contaminantes en lisímetros.

### **Walter López Báez**

Instituto Nacional Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria  
lopez.walter@inifap.gob.mx

Ingeniero agrónomo con especialidad en agricultura tropical. egresado del colegio superior de agricultura tropical. Cárdenas. Tabasco. Maestría en planificación y manejo integral de recursos naturales, con la especialidad en cuencas hidrográficas en el centro agronómico tropical de investigación y enseñanza (CATIE), Costa Rica.

Tiene más de 30 años de experiencia como investigador en los temas de manejo integral de cuencas y agricultura de conservación. Ha escrito más de 30 artículos y publicaciones técnicas sobre el tema de la conservación del suelo, servicios ecosistémicos y manejo integral de cuencas, es autor principal de la metodología de intervención para el manejo integral de cuencas con enfoque social. Integrante del grupo de operación integral con sentido social y protección de la población (GOIGSSPP) para el manejo de la cuenca del complejo hidroeléctrico Grijalva, creado a partir del decreto presidencial del 01 de dic de 2020.

En los últimos 10 años se ha dedicado a generar para el estado de Chiapas un modelo de restauración productiva de suelos degradados cultivados con maíz, el cual ha iniciado su aplicación masiva, gracias a la articulación lograda entre los productores, las instituciones de gobierno y la iniciativa privada. Coordinador del convenio INIFAP-CFE para realizar el proyecto “estudio para la gestión integral de las cuencas aportadoras al embalse de la central hidroeléctrica Ángel Albino Corzo: fase 1, planeación” realizado en el año 2022.

Director de coordinación y vinculación del INIFAP en el estado de Chiapas y líder nacional del programa de investigación de manejo de cuencas del INIFAP.

### **Williams Vázquez Morales**

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgo y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas  
williams.vazquez@unicach.mx

Ingeniero Químico egresado del Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con una Maestría y un Doctorado en Ciencias de la Tierra por parte del Instituto de Ciencias de la Atmosfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra y de la Maestría en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IIGERCC) de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel I de CONAHCyT. Sus líneas de investigación están enfocados a la Modelación Meteorológica a escala Urbana, Calidad del Aire, Islas de Calor Urbano, manejo de Vehículos Aéreos no Tripulados para la meteorología urbana, Innovación de instrumentación meteorológica e inventarios de emisiones. En la cual ha dirigido tesis de licenciatura y maestría, colaborado en proyectos de investigación para el estudio de problemáticas socioambientales presentes en Ciudades del estado de Chiapas.

Actualmente forma parte del Cuerpo Académico “Cambio Climático y Contaminación Atmosférica” adscrito al IIGERCC.



# Rectoría

Mtro. Juan José Solórzano Marcial  
RECTOR

Dra. Magnolia Solís López  
SECRETARÍA GENERAL

Mtro. Rafael de Jesús Araujo González  
SECRETARIO ACADÉMICO

Lic. Enrique Pérez López  
DIRECTOR GENERAL DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

Dra. Sandra Urania Moreno Andrade  
DIRECTORA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIOS CLIMÁTICOS

**Colección  
Jaguar**



**UNICACH**

*Geociencias y riesgos  
socioambientales en Mesoamérica*

Se terminó de imprimir durante el mes de diciembre de 2024 en MM&R digital S.A. de C.V., Teléfono: (55) 56-88-60-85, Naucalpan de Juárez, Estado de México, con un tiraje de 65 ejemplares. El diseño tipográfico estuvo a cargo de Salvador López Hernández, la corrección de Luciano Villarreal Rodas. El cuidado de la edición fue supervisada por la Oficina Editorial de la UNICACH, durante el rectorado del Mtro. Juan José Solórzano Marcial

Integrantes del Cuerpo Académico Gestión de Riesgos de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas coordinan el libro *Geociencias y riesgos socioambientales en Mesoamérica*, derivado de la inquietud ¿Qué tan preparados estamos para enfrentar los desastres? En septiembre de 2017, un sismo de magnitud 8.2 sacudió el sur de México, dejando a su paso gran devastación y un sinnúmero de preguntas sobre nuestra capacidad para responder a tales eventos.

A lo largo de estas páginas, exploraremos cómo la formación de grupos de respuesta rápida post-sísmica y el análisis de la vulnerabilidad ambiental pueden transformar nuestra manera de enfrentar distintos desafíos ambientales y potenciales desastres. Desde la antropización de la cobertura vegetal de los paisajes físico-geográficos hasta el monitoreo de la calidad del aire, cada apartado ofrece una visión única y profunda de los desafíos que enfrentamos.

### **Un enfoque multidisciplinario**

Este libro está constituido por contribuciones de expertos en Ciencias de la Tierra y Ciencias Sociales del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la UNICACH y colaboradores invitados. Cada capítulo no solo presenta datos y análisis, sino que también invita a la reflexión sobre cómo podemos construir comunidades más resilientes a través de una perspectiva integral sobre la evaluación y gestión de riesgos en diversas regiones de Mesoamérica.

### **Un llamado a la acción**

Las investigaciones aquí presentadas no son sólo para académicos, estudiantes y profesionales, sino para todos aquellos interesados en la sostenibilidad y la seguridad de nuestras comunidades. Juntos, podemos aprender de los desastres pasados y prepararnos mejor para el futuro.

