

A topographic map of Mexico, showing the country's terrain in shades of brown, tan, and green, with the surrounding oceans in dark blue. The map is oriented vertically, with the Gulf of Mexico on the left and the Pacific Ocean on the right. The title text is overlaid on the right side of the map.

Atlas

de vulnerabilidad hídrica en

México

ante el cambio climático

Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México



577.22072 Arreguín Cortés, Felipe I., coord..
A78 Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático / Felipe I. Arreguín Cortés, Mario López Pérez, Olivia Rodríguez López y Martín José Montero Martínez, coordinadores.. -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015.
148 p. ; 28 x 43 cm

ISBN: 978-607-9368-07-4 (versión impresa)
ISBN: 978-607-9368-09-8 (versión digital)

1. Cambio climático 2. Efectos del clima 3. Recursos hídricos 4. Vulnerabilidad hídrica 5. México

Coordinación técnica:
Coordinación de Hidrología

Coordinación editorial:
Coordinación de Comunicación,
Participación e Información.

Revisión de mapas:
José Alberto Balancán Soberanis

Diseño de portada:
Oscar Alonso Barrón

Diseño y formación:
Luis Enrique Nájera Zamora

Corrección de estilo:
Antonio Requejo del Blanco

Primera edición: 2015

DR © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
México

www.imta.org.mx

ISBN: 978-607-9368-07-4 (versión impresa)
ISBN: 978-607-9368-09-8 (versión digital)

Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de la presente publicación puede ser reproducida, almacenada en sistemas de recuperación de información, transmitida bajo cualquier forma o por ningún medio, sea electrónico, mecánico, de fotocopia o grabación, sin la previa autorización, por escrito, de los editores.

Impreso en México – *Printed in Mexico*

CONTENIDO

Prólogo	6
Presentación	7
Capítulo 1	9
Conceptualización de vulnerabilidad y construcción de un Índice de Vulnerabilidad Social Denise Soares, Roberto Romero y Ricardo López	
Capítulo 2	41
Escenarios de cambio climático para México José Antonio Salinas Prieto, Gabriela Colorado Ruiz y María Eugenia Maya Magaña	
Capítulo 3	71
Riesgo municipal por época de lluvias y ciclones tropicales en México y proyecciones bajo escenarios de cambio climático Ricardo Prieto González, María Eugenia Maya Magaña, José Guadalupe Rosario de la Cruz y Célica Sánchez Medina	
Capítulo 4	89
Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México (agua superficial) Iván Rivas Acosta	
Capítulo 5	101
Vulnerabilidad de la agricultura de riego mexicana al cambio climático: actualización 2014 Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez, Ronald E. Ontiveros Capurata y Mauro Íñiguez Covarrubias	
Capítulo 6	133
Índice de riesgo en la calidad del agua bajo escenarios de cambio climático en México Norma Ramírez Salinas, Camilo Vázquez Bustos y María Eugenia Maya Magaña	

PRÓLOGO

La importancia del cambio climático a nivel global ha aumentado significativamente, al menos durante las últimas tres décadas. En su más reciente reporte del 2013, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (mejor conocido como IPCC, por sus siglas en inglés), afirma que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco y que se están observando cambios que no tienen precedentes. Estos cambios significativos en las variables climatológicas, en particular de la precipitación y la temperatura, han puesto en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico en muchos países, y en particular a la población de escasos recursos de los países en vías de desarrollo, quienes padecerán los efectos más negativos debido a su mayor vulnerabilidad. En este contexto, la orientación o directrices que han regido la administración, uso y cuidado del agua en México, incorporando el componente del cambio climático, se están adecuando de acuerdo con la situación social, económica y política del país.

En la presente administración, la sustentabilidad es el principio básico de la política hídrica, que permitirá satisfacer las demandas de los usuarios actuales sin comprometer las futuras, encontrando y operando mecanismos y estrategias que garanticen equilibrios de mediano y largo plazos. Sin embargo, esta sustentabilidad está siendo seriamente amenazada por el cambio climático, que al igual como ocurre en varios países a nivel global, es uno de los fenómenos ambientales que mayor interés ha despertado en las últimas décadas debido al gran impacto adverso que ha causado en diversos sectores, en particular en el sector hídrico del país.

Ante este escenario, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en colaboración con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y en congruencia con lo establecido por el Gobierno Federal en las Metas Nacionales del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, la Ley General de Cambio Climático, la Ley de Aguas Nacionales y el Programa Nacional Hídrico, han impulsado los estudios de vulnerabilidad para conocer de manera cuantitativa los efectos de este fenómeno en la disponibilidad en cantidad y calidad del recurso hídrico, en la agricultura, y en la sociedad ante eventos hidrometeorológicos extremos, como lo son las sequías, huracanes y tormentas tropicales, entre otros temas.

Como resultado de este esfuerzo conjunto, se elaboró la actualización del *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. El documento, que se suma a las publicaciones técnico-científicas que se han generado en el tema de cambio climático en México, lleva a una reflexión para dimensionar el problema y promueve la participación de todos los sectores del país en la construcción de una estrategia sustentada de adaptación para hacer frente a este fenómeno y, con ello, reducir la vulnerabilidad de los sectores más desfavorables ante este tipo de eventos extremos. La CONAGUA y el IMTA promueven, a través de esta publicación, fortalecer el conocimiento que permite desarrollar políticas públicas más adecuadas para hacer frente a los efectos del cambio climático que se están presentando en nuestro país.





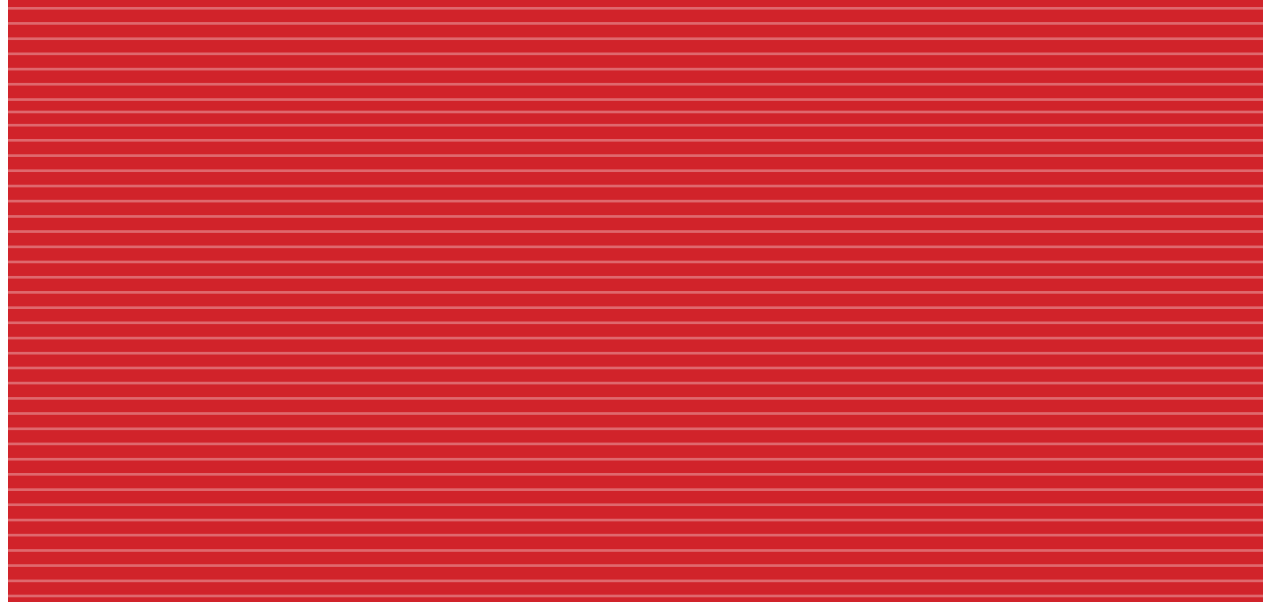
PRESENTACIÓN

Actualmente, la disminución de disponibilidad de agua o calidad suficientes, resulta uno de los problemas más difíciles de afrontar para el desarrollo de México, en consecuencia, se planteó la meta de mejorar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad.

Diversos estudios en México, a partir de la generación de escenarios climáticos, coinciden en señalar que se presentarán variaciones de temperatura y precipitación con distinta intensidad y frecuencia, que a su vez incrementarían la vulnerabilidad social de: las comunidades con una menor capacidad de adaptación ante eventos extremos, la disponibilidad del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas, así como la producción de alimentos. Por ello, es fundamental generar la información base para identificar las zonas más vulnerables en ciertos sectores a nivel nacional.

Dentro del actual Programa Especial de Cambio Climático (PECC) el IMTA tiene diversas actividades, de las cuales destacan “Reducir la vulnerabilidad de la población y sectores productivos e incrementar su resiliencia y la resistencia de la infraestructura estratégica” y las líneas estratégicas “Evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos” y “Desarrollar metodologías e indicadores para fortalecer capacidades a nivel local para reducir vulnerabilidad hídrica frente al cambio climático”.

En atención a los puntos anteriores, el IMTA presenta ahora la actualización del atlas publicado en 2010, el *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Dicha actualización está basada en que, por un lado, ya existen nuevos resultados de las proyecciones climáticas de los modelos climáticos globales que recientemente participaron en el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC-AR5 por sus siglas en inglés) y, por otro, existe información relevante actualizada que incide dentro de los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad del atlas anterior. Los sectores considerados fueron el social, agrícola e hidrometeorológico (calidad del agua, escurrimiento superficial y eventos extremos).



CAPÍTULO 1

CONCEPTUALIZACIÓN DE VULNERABILIDAD Y CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL

Denise Soares, Roberto Romero y Ricardo López





RESUMEN

El cambio climático es uno de los aspectos ambientales que mayor eco social ha alcanzado en los últimos años debido a sus posibles consecuencias, las que, en muchas ocasiones, han adquirido peligrosos tintes de irreversibilidad. Los efectos del cambio climático son potencialmente más significativos para la población pobre en los países en vías de desarrollo que para los habitantes de las naciones desarrolladas por su mayor sensibilidad a la exposición de variables climáticas y a su menor capacidad de resiliencia.

En este contexto, evaluar la vulnerabilidad de los grupos sociales frente al cambio climático cobra especial relevancia por permitir identificar e implementar medidas orientadas a promover procesos de adaptación y mitigación, reduciendo así las consecuencias negativas del cambio climático en los procesos de desarrollo. Aproximarse al abordaje del cambio climático desde el referente de la vulnerabilidad social hace posible entender y explicar las causas y síntomas de las consecuencias sociales de los desastres. Asimismo, el concepto “vulnerabilidad” tiene un relevante valor político por constituir una base operativa para el diseño de políticas sociales y de cambio climático.

En esta contribución se actualiza el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) que integró el *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, publicado en 2010. Los cambios con relación a la versión original tienen que ver con la actualización de la base de datos y la modificación de la ponderación de las variables que la conforman. Es importante resaltar que el IVS construido puede tener diferencias importantes con las regiones hidrológicamente más vulnerables, dado que una región hidrológicamente vulnerable no necesariamente es una región socialmente vulnerable. Los factores físicos y ambientales presentan vulnerabilidades distintas a las socialmente observadas.

Con el IVS se puede conocer rápida y gráficamente el grado de vulnerabilidad social de los 2,456 municipios del país. Con esta herramienta, los tomadores de decisión en materia de políticas públicas pueden identificar las necesidades prioritarias de las regiones vulnerables e implementar políticas sociales que promuevan procesos de adaptación y mitigación entre la población afectada, reduciendo así las consecuencias negativas del cambio climático en los procesos de desarrollo.

INTRODUCCIÓN

Hace dos décadas, el tema del cambio climático estaba circunscrito a discusiones entre especialistas de las ciencias atmosféricas y a la elaboración de modelos climáticos. En la actualidad, el tema se ha vuelto prioritario para la agenda de desarrollo internacional y es punto de debate entre diferentes sectores sociales. El motivo radica en que el cambio climático se ha convertido en la amenaza más grave para el desarrollo sostenible y pondrá en peligro el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), si no tenemos éxito al enfrentarlo. Tal y como lo plantea el *Informe sobre desarrollo humano 2007-2008* del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD):

Las medidas que tomemos hoy con respecto al cambio climático tendrán consecuencias que perdurarán por un siglo o más. Es imposible revertir en un futuro previsible la parte de este cambio causada por las emisiones de gases de efecto invernadero. Los gases que retienen el calor y que enviamos a la atmósfera en 2008 permanecerán allí hasta 2108 y más. Por lo tanto, lo que decidamos hacer hoy no sólo afectará nuestra propia vida, sino aún más la vida de nuestros hijos y nietos. Esto es lo que hace del cambio climático un desafío distinto y más difícil que otros desafíos en el campo de las políticas públicas (PNUD, 2007:5).

El cambio climático amenaza el cumplimiento no sólo de los ODM, sino que puede paralizar, e incluso revertir, los avances conseguidos en términos de reducción de pobreza, derechos humanos, educación, salud e infraestructura, entre otros ámbitos. Gran parte de la amenaza del cambio climático radica en la afectación

del ciclo hidrológico y los regímenes de lluvias, intensidad y frecuencia de eventos extremos y sequías cada vez más graves, entre otros fenómenos. Todo ello impacta directamente a las poblaciones humanas, amenazando sus medios de sustento, salud, seguridad e incrementando su vulnerabilidad (PNUD, 2008).

El cambio climático pone de manifiesto los distintos grados de vulnerabilidad social existentes en el mundo, pues son los países que producen menor cantidad de emisiones los que podrían ver sus sistemas naturales y humanos más severamente afectados debido a que sus medios de sustento son altamente dependientes de los recursos naturales, tienen altos grados de marginación y son más vulnerables al hambre y a la pobreza, entre otros factores (PNUD, 2008).

De acuerdo con el Instituto de Recursos Mundiales (2006), más de 1,300 millones de personas dependen de la agricultura, la pesca y los bosques para su trabajo y supervivencia. Para estas personas, el cambio climático supone una amenaza que se añade a los riesgos que ya enfrentan cotidianamente, interactuando con ellos e incrementando sus efectos. Por lo tanto, el cambio climático puede representar un serio obstáculo para la erradicación de la pobreza, pudiendo llegar a aumentar la brecha existente entre países desarrollados y en desarrollo.

Por esta razón, el análisis de la vulnerabilidad social debe ser tomado en cuenta como un factor clave que actúa en la conformación del riesgo ante posibles desastres, a través de la promoción o debilitamiento de la resiliencia y la adaptación social. La “vulnerabilidad social” es un concepto central para predecir y entender la existencia de impactos diferenciados en los distintos grupos de una



sociedad, dado que son las características internas de los elementos expuestos a las amenazas las que los hacen propensos a sufrir mayores o menores daños al ser impactados por éstas.

Esta investigación se ha desarrollado en aras de aportar elementos de análisis sobre los niveles de vulnerabilidad que padecen los municipios de nuestro país, así como brindar datos que sirvan de insumo para implementar programas y acciones orientados a la reducción de la vulnerabilidad social frente a eventos meteorológicos extremos. El estudio tiene como objetivo generar información sobre la vulnerabilidad social mediante la construcción de un índice de vulnerabilidad social en el país, con una escala de análisis que abarca el ámbito de municipio.

CONCEPTUALIZANDO LA VULNERABILIDAD SOCIAL

Tanto la literatura académica como los informes de agencias internacionales donde se aborda el tema de la vulnerabilidad, parten de la premisa de que las variables económicas no son suficientes para entender dicha condición y tampoco diseñar políticas dirigidas a mitigarla y bloquear los mecanismos que promueven su reproducción intergeneracional. Autores como Moser *et al.* (2008), Adger (2003), Kaztman (1999), Filgueira (1998), Pizarro (2001), Blaikie *et al.* (1998), Busso (2001) y Macías (1992), entre otros estudiosos del tema, desde sus respectivos campos de investigación coinciden que el crecimiento económico per se no produce, necesaria y linealmente, desarrollo social, y recuerdan que las instituciones y el sistema social son elementos fundamentales para el acceso a los beneficios económicos y otros recursos que son básicos movilizar para la reducción de la vulnerabilidad.

La construcción del concepto “vulnerabilidad social” integra nociones de la sociología, economía, ciencias políticas y antropología, y por ser un concepto que transita entre las fronteras de distintas disciplinas, representa un avance en el intento por construir nuevas categorías de análisis para entender y explicar las causas y síntomas de las consecuencias sociales de los desastres. Además de su importancia teórica, dicho concepto tiene un relevante valor político, por constituirse una base operativa para el diseño de políticas sociales y de cambio climático. Si bien se reconoce ampliamente la riqueza del enfoque de vulnerabilidad para la interpretación de forma más nutrida de la problemática de la desigualdad social, también se tiene claro que dicho concepto se encuentra en proceso de construcción teórica y operativización metodológica.

Filgueira (2001) hace un aporte relevante a la comprensión de la vulnerabilidad social, al deslindarlo de la dicotomía pobre-no pobre, y propone una dinámica de configuraciones vulnerables, susceptibles de movilidad social descendente, las cuales pueden encontrarse en sectores marginados o no¹. Desde la perspectiva del mencionado autor, la vulnerabilidad social es una condición negativa resultante de la intersección de dos conjuntos: a) uno a nivel “macro”, relativo a la estructura

de oportunidades, y b) el otro, a nivel “micro”, referido a los activos de los actores. Kaztman (1999) coincide con Filgueira al referirse al nivel de vulnerabilidad de un hogar como su capacidad para controlar las fuerzas que lo afectan, las cuales dependen de la posesión o control de activos; es decir, de los recursos requeridos para el aprovechamiento de las oportunidades que brinda el medio en que se desenvuelve. El enfoque de género explicita que, en la mayoría de los casos, los hombres tienen el control de los activos, lo que los habilita a acceder a mayores oportunidades que las mujeres.

Con relación a la primera variable contenida en el concepto “vulnerabilidad social”, las “estructuras de oportunidades” se definen como probabilidades de acceso a bienes, servicios o al desempeño de actividades. Estas oportunidades inciden sobre el bienestar de los hogares y están estrechamente vinculadas entre sí, de tal suerte que el acceso a determinados bienes, servicios o actividades provee recursos que facilitan, a su vez, el acceso a otras oportunidades. La estructura de oportunidades proviene del mercado, del Estado y de la sociedad. Tradicionalmente, el mercado ha sido considerado como uno de los principales asignadores de recursos. De hecho, existe un consenso generalizado sobre la conveniencia de concentrar los esfuerzos nacionales en la creación de condiciones que permitan el funcionamiento eficiente del mercado, como una condición para aumentar la competitividad nacional en un mundo globalizado. Dicha propuesta es avalada por los organismos internacionales de mayor influencia en la elaboración de lineamientos para el manejo de las economías (Filgueira, 1998; Kaztman, 1999).

El rol que juega el Estado sobre la estructura de oportunidades depende de la matriz institucional de cada país; cuanto más fuerte sean las instituciones, mayor será su relevancia en la incidencia sobre la estructura de oportunidades. El Estado, a través de su impacto en la producción, distribución y uso de activos, facilita el acceso a los canales de movilidad e integración social. Las funciones del Estado se relacionan con facilitar un uso más eficiente de los recursos ya disponibles en el hogar, proveer nuevos activos o regenerar aquellos agotados. Además, el Estado es un agente clave en tanto regulador de las otras dos esferas —mercado y sociedad— y por su rol vinculante entre las mismas.

La sociedad, mediante diferentes formas de asociación (sindicatos, corporaciones empresariales, movimientos sociales orientados a incidir en la toma de decisiones, entre otros) y redes de interacción, puede ser señalada como una tercera fuente de alteración de la estructura de oportunidades (Filgueira, 2001; Kaztman, 1999).

El segundo nivel de variables del concepto “vulnerabilidad social” está conformado por los activos de las personas. Los activos se refieren a la posesión, control o movilización de recursos materiales y simbólicos que permiten al individuo desenvolverse en la sociedad. Ello involucra capital físico², financiero³, humano⁴, social⁵, natural⁶, político⁷ y cultural⁸. Conceptualizar, comprender y analizar la formación, uso y reproducción de los capitales para el estudio de la vulnerabilidad social son elementos clave en la definición de las posibilidades de construir procesos tendientes a minimizar la vulnerabilidad y crear situaciones dinámicas de bienestar (Filgueira, 2001).

2. El capital o activo físico incluye infraestructura como viviendas, animales, maquinarias, transportes, herramientas, etcétera.
3. El capital o activo financiero incluye ahorro monetario, créditos, acciones, bonos y otros instrumentos financieros de uso habitual en el sistema financiero formal e informal (Busso, 2001).
4. El capital o activo humano se refiere a los recursos de que disponen los hogares en términos de cantidad y calidad de fuerza de trabajo del hogar y el valor agregado en educación, salud, acceso a la información y capacitación de sus integrantes (Busso, 2001).

Según Busso (2001), las condiciones de vulnerabilidad se refieren a la capacidad de respuesta de las personas, hogares o comunidades, resultante de la relación entre el “entorno” y el “interno”, como consecuencia de la exposición a algún tipo de amenaza. El autor aclara que el “entorno” ofrece un conjunto de oportunidades vinculadas a los niveles de bienestar a los cuales se acceden en un determinado territorio y periodo de tiempo. Lo “interno” enfatiza la cantidad, calidad y diversidad de los recursos, activos o capitales que pueden ser movilizados para enfrentar la amenaza, lo cual hace referencia directamente a la “capacidad de respuesta” de las personas, hogares o comunidades.

Blaikie *et al.* (1998) proponen que la vulnerabilidad es una combinación de características de una persona, hogar o comunidad expresadas en relación con la exposición a una amenaza derivada de su propia condición social y económica. Las mujeres tienen tanto capacidades como vulnerabilidades, y muchas de éstas son distintas a las de los hombres; es decir, existe una construcción social de vulnerabilidades y capacidades de género desiguales y jerárquicas, que otorgan privilegios mayores a los hombres y que no reconocen ni valoran la aportación femenina (Díaz, 2010).

El aporte de Blaikie a la construcción del concepto “vulnerabilidad” consiste en la afirmación de que las amenazas no son naturales, sino son los sistemas sociales y políticos que crean las condiciones en las cuales las amenazas tienen un impacto diferencial sobre diferentes grupos dentro de las sociedades. Según el autor, la naturaleza forma parte de la estructura social de la sociedad, a través de la utilización de los recursos naturales para las actividades económicas, y las amenazas están entrelazadas con los sistemas humanos al afectar los activos y medios de vida de las poblaciones.

De esa manera, no se puede plantear la vulnerabilidad en general, sino el concepto debe estar siempre acompañado con la pregunta: ¿vulnerable a qué? Es decir, la vulnerabilidad, al contrario de la pobreza, se construye y manifiesta en el contexto de una amenaza real. Este planteamiento lleva a una conclusión importante, relativa a que las personas serán vulnerables en diferentes grados a diferenciadas amenazas, de tal suerte que una persona puede ser vulnerable a la pérdida de propiedad o de la vida por causa de inundaciones, pero no manifiesta vulnerabilidad ante fenómenos de sequía (Blaikie *et al.*, 1996).

Macías (1992) se refiere al término “vulnerabilidad” como el grado de susceptibilidad de recibir daños por parte de un grupo social frente a un fenómeno desastroso, aunado a su capacidad de recuperación. El autor hace hincapié en la condición dinámica de la categoría, en tanto se refiere a la capacidad de modificación de una determinada condición a otra, posterior al daño recibido. Coincide con Blaikie *et al.* (1998) al rescatar los contenidos temporal y espacial implícitos en el concepto, donde se manifiestan las condiciones generadoras de la situación susceptible.

5. El capital o activo social se refiere a un atributo colectivo que incluye relaciones, lazos de confianza, reciprocidad, redes, etc. A diferencia del capital humano, que se refiere a personas, el capital social se ubica en el ámbito comunitario (Busso, 2001). Por ser un activo de extrema relevancia para la recuperación de los desastres, se ahondará más adelante en dicho concepto.
6. El capital o activo natural se refiere a fuentes de agua segura, tierras productivas, bosques y todos los recursos naturales que los habitantes usan para su producción y reproducción social.
7. El capital político se asocia con la relación entre las instituciones y organizaciones que tiene la comunidad.
8. El capital cultural está constituido por las costumbres, tradiciones y creencias que identifican a un grupo de personas como comunidad. Es la forma en que la gente ve el mundo y define cuáles cosas tienen valor, qué se da por hecho y cuáles cosas percibimos como posibles de cambio (Gutiérrez y Siles, 2008).

1. El autor abunda en el tema dando algunos ejemplos que dilucidan su proposición: “La condición determinada por la maternidad adolescente, de la madre a cargo de la familia monoparental, los sectores de trabajadores desplazados por la obsolescencia de sus saberes específicos, las parejas jóvenes con hijos en edades inferiores a los 10 años, o los jóvenes que no estudian ni trabajan, son tan sólo los ejemplos de ciertas configuraciones que dan lugar a una conceptualización que observa el fenómeno del bienestar social desde una perspectiva intrínsecamente dinámica.” (Filgueira, 2001:7).

De esa forma, la vulnerabilidad está supeditada a la disponibilidad de recursos y mecanismos ágiles para acceder a ellos.

Desde otra perspectiva, Barriga (2004) plantea que la vulnerabilidad social está determinada por múltiples factores, algunos de los cuales se relacionan con políticas, instituciones, carencia de activos, y se expresa en condiciones de fragilidad o falta de resiliencia que predisponen a una comunidad o individuos por sus condiciones de edad, género, etnia, política, social y económica a sufrir daño diferencial por exponerse ante una amenaza que genera un desastre, como pudiera ser los huracanes o sequías. Para comprender la vulnerabilidad, se debe reconocer que existen múltiples formas de vivir la vulnerabilidad y también diferenciadas estrategias para contrarrestarla hacia una mayor resiliencia. Dazé et al. (2010) plantean como definición de resiliencia:

La resiliencia es un concepto familiar en el contexto de la reducción de riesgos de desastre (RRD), y cada vez más se debate sobre ella en el campo de la adaptación. Una comunidad resiliente es capaz de enfrentar las amenazas para minimizar sus efectos y/o recuperarse rápidamente de los efectos negativos, con lo cual su situación se mantiene igual o mejora en comparación con el periodo anterior a la amenaza. Existen fuertes nexos entre la resiliencia y la capacidad adaptativa; como tal, la resiliencia también varía mucho para los diferentes grupos que conforman una comunidad. (Dazé et al., 2010:6).

Una definición operativa de vulnerabilidad la ofrece el grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones sobre Vulnerabilidad y Riesgos (HVRI, por sus siglas en inglés)⁹, quienes la conciben como la susceptibilidad de una población, sistema o lugar dado, para sufrir algún daño por exposición a una amenaza y que afecta directamente su capacidad de prepararse, responder y recuperarse de los desastres (Cutter et al., 2009).

Desde este enfoque, la vulnerabilidad social tiene que ver explícitamente con los factores demográficos y socioeconómicos que incrementan o atenúan los impactos de los eventos de riesgo en las poblaciones locales; es decir, la vulnerabilidad social ayuda a definir quién está en riesgo y en qué grado puede verse perjudicado. Cutter y su equipo aclaran que las características socioeconómicas y demográficas de una población no determinan quiénes se verán afectados por un desastre natural, sino la capacidad que tiene una población para prepararse, responder y recuperarse cuando el desastre golpea. Con esta visión incorporan la resiliencia al concepto, pues destacan la capacidad de una población, sistema o lugar de amortiguar o adaptarse a las nuevas exposiciones de riesgo (Cutter et al., 2009).

Esta revisión breve de algunos autores que abordan la definición “vulnerabilidad social”, nos permite emitir algunos comentarios de naturaleza preliminar. En primer lugar, es evidente que no existe un consenso en cuanto al concepto propiamente dicho de “vulnerabilidad social”. Su definición sigue siendo un terreno de disputas entre distintas disciplinas. En segundo lugar, independientemente de las disputas, hay un relativo consenso entre los autores, en cuanto a la relevancia del contexto y el tipo de “amenaza” en la definición de las variables y factores de vulnerabilidad. Se reconoce, entonces, que la vulnerabilidad no puede ser aislada de su contexto y de una amenaza particular y construida artificialmente. La fuerza de la noción “vulnerabilidad social” está en el hecho de que se origina y tiene impacto en comportamientos humanos y actividades sociales debidamente contextualizadas y, cómo tal, debe ser tomada en cuenta en las políticas y programas de gestión de riesgos de desastres.

9. Este equipo es dirigido por Susan L. Cutter y está adscrito al Departamento de Geografía de la Universidad de Carolina del Sur, EUA.

BREVE ACERCAMIENTO A ALGUNAS METODOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD SOCIAL (IVS)

Una vez analizado y definido el concepto “vulnerabilidad social”, se procedió a consultar diversas metodologías a fin de construir un Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) que permita medir el grado de vulnerabilidad que presenta cada uno de los 2,456 municipios del país. Las metodologías analizadas fueron tres: a) el IVS (SoVI, por sus

siglas en inglés) desarrollado por el HVRI de la Universidad de Carolina del Sur, EUA, b) el IVS creado por el Sistema Integrado de Indicadores Sociales del Ecuador (SIISE), y c) el IVS planteado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de México.

A fin de analizar los puntos de encuentro y desencuentro en la forma en que construyeron sus índices las tres fuentes consultadas, se presenta un cuadro comparativo con los distintos indicadores (socioeconómicos, demográficos, institucionales y de percepción social) que incluyeron dichas metodologías para definir la vulnerabilidad social de las poblaciones. Posteriormente, se expondrán algunas reflexiones en torno a los alcances y aportes que hicieron estos métodos a la construcción del IVS desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Cuadro 1.1. Análisis comparativo entre indicadores utilizados en tres metodologías para la construcción del Índice de Vulnerabilidad Social (IVS).

Tema	Indicadores del HVRI (SoVI)	Indicadores del SIISE	Indicadores del CENAPRED
Salud	Mayor densidad de establecimientos y servicios médicos	---	Médicos por cada 1,000 habitantes
	---	Riesgo de mortalidad de niños(as) menores de un año	Tasa de mortalidad infantil
	% de beneficiarios de la seguridad social	---	% de población no derechohabiente
Educación	---	% de desnutrición de niños y niñas	---
	---	% de analfabetismo de población adulta	% de analfabetismo de la población mayor de 15 años
	% que estudió menos que secundaria	---	% de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela
	---	---	Grado promedio de escolaridad
	---	---	% de viviendas sin agua entubada
Vivienda	---	---	% de viviendas sin drenaje
	---	---	% de viviendas sin electricidad
	---	---	Déficit de vivienda
	---	---	% de viviendas con piso de tierra
	---	---	% de viviendas con paredes de material de desecho y lámina de cartón
Empleo e ingreso	% de rentistas	---	---
	% de propietarios	---	---
	% de población en condiciones de pobreza	% de pobreza de consumo en los hogares	% de la Población Económicamente Activa (PEA) que recibe menos de dos salarios mínimos
	Ingreso per cápita	---	---
	% de desempleados	---	Tasa de desempleo abierto
	% de trabajadores en puestos bajos del sector servicios	---	---
	% de trabajadores agrícolas	---	---

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

	Crecimiento rápido de la población	---	Densidad de población
Población	---	---	Dispersión poblacional
	% afro-americanos	Presencia de comunidades étnicas y rurales	% de población de habla indígena
	% hispanos		
Género	% jefas de familia	---	---
Estructura familiar	% de hogares con padres solos	---	---
	Familias grandes		
Edad	% de menores de 18 años	---	Razón de dependencia
	% de personas de edad avanzada		
Poblaciones con necesidades especiales	Personas sin hogar, migrantes, residentes de hogares de ancianos	---	---
Percepción local del riesgo	---	---	% de pobladores que identifican peligro en la ocurrencia de eventos climáticos
Capacidad de prevención y respuesta	---	---	Existencia de instituciones y/o programas para la prevención, atención y respuesta a eventos extremos

Fuente: Elaboración propia.

La metodología SoVI, desarrollada por el HVRI, es una herramienta utilizada para cuantificar los impactos sociales en las comunidades estadounidenses afectadas por los eventos extremos derivados del cambio climático, tales como: huracanes, inundaciones, aumento del nivel del mar, etcétera.

El SoVI sintetiza y describe las principales variables socioeconómicas y demográficas, que de acuerdo con la literatura especializada, contribuyen a la reducción de la capacidad de una comunidad para enfrentar los peligros y desastres. Los datos que utilizan los obtienen de fuentes de datos nacionales, principalmente del Censo de los Estados Unidos. No obstante, la aplicación del SoVI en México no es factible debido a que incluye indicadores que no se contabilizan en los censos mexicanos, tales como la densidad de establecimientos y servicios médicos y poblaciones con necesidades especiales (discapacitados, migrantes, etcétera), entre otros. Asimismo, no existen datos confiables acerca del número de familias que cuentan con vivienda propia ni el número de familias que son arrendatarias (Cutter *et al.*, 2009).

La metodología generada por el Sistema Integrado de Indicadores Sociales del Ecuador (SIISE, 2003), incluye sólo cinco variables socioeconómicas para medir la vulnerabilidad social de los cantones (municipios) del Ecuador. Cabe señalar que este es un índice muy simple y su principal problema radica en que se centra en aspectos que se confunden con el índice de marginalidad, además de no incluir aspectos o variables que den cuenta de los procesos de urbanización no planificada.

Finalmente, en México, la metodología desarrollada por el CENAPRED para la construcción del índice de vulnerabilidad social frente a peligros y riesgos, comparte las ideas centrales del HVRI, al poner el acento en las características sociales y económicas de una población como las limitantes de la capacidad de respuesta a los peligros y desastres. Aunque el CENAPRED agrega la percepción local del riesgo

y la existencia de instituciones y/o planes de atención al riesgo (principalmente Protección Civil), como elementos centrales en la definición de la vulnerabilidad social. El principal problema para instrumentar un índice de este tipo para todo el país, es que no existen mediciones en el ámbito municipal sobre la percepción al riesgo ni sobre la existencia de instituciones y planes de prevención y atención al riesgo (García Arróliga *et al.*, 2006).

METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL

Una vez sistematizadas, comparadas y analizadas las metodologías mencionadas en los acápites anteriores, en el IMTA se desarrolló el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) en el ámbito municipal para México, el cual retoma algunos aspectos de las metodologías analizadas. Cabe aclarar que una limitante de relevancia para la definición de variables o indicadores socioeconómicos y demográficos que mejor caracterizan la vulnerabilidad social de las localidades mexicanas, fue la inexistencia de algunos datos municipales en los censos y estadísticas nacionales. Con esta restricción quedaron fuera del IVS variables institucionales, culturales y organizativas tales como: existencia de instituciones, planes y programas de protección civil; percepción que los habitantes tienen sobre el riesgo en sus localidades; potencial y antecedente organizativo de las poblaciones, entre otros aspectos que deberían estar presentes en la versión ideal de un índice de

vulnerabilidad social integral. Se podrían construir estos datos mediante técnicas cuantitativas y cualitativas; sin embargo, actualmente no existe un programa o política pública que esté trabajando para generar esta información. Hecha esta salvedad, se comparte a continuación el proceso metodológico de construcción del IVS para los municipios de México.

La edificación del IVS implica el desarrollo de tres niveles de acercamiento: a) la definición temática y construcción de indicadores, con su clasificación de acuerdo con la condición de vulnerabilidad establecida, b) la construcción de índices de vulnerabilidad temática, y c) la construcción del índice de vulnerabilidad social definitivo.

DEFINICIÓN TEMÁTICA Y CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES

Con la información disponible en las estadísticas nacionales, principalmente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO), se seleccionaron 15 indicadores que se agruparon, siguiendo la propuesta del CENAPRED, en cinco grandes temas que determinan la capacidad de desarrollo de una comunidad: a) empleo e ingreso, b) educación, c) salud, d) vivienda y e) población. En el siguiente cuadro se muestran los indicadores que reflejan mejor la vulnerabilidad de una población al enfrentar amenazas y riesgos derivados del cambio climático.

Cuadro 1.2. Indicadores seleccionados para construir el IVS.

Tema	Indicadores	Fuente
Salud	Proporción de médicos por cada 1,000 habitantes	Secretaría de Salud
	Tasa de mortalidad infantil (proporción de niños fallecidos antes de un año, en relación a los nacidos vivos en el mismo periodo)	CONAPO
Educación	Porcentaje de población no derechohabiente (% de población que no cuenta con servicios de salud pública)	INEGI
	Porcentaje de analfabetismo (% de población de 15 años y más que no sabe leer ni escribir)	INEGI
	Grado promedio de escolaridad	INEGI
Vivienda	Porcentaje de viviendas sin agua entubada	INEGI
	Porcentaje de viviendas sin drenaje	INEGI
	Déficit de vivienda (% de viviendas que faltan para satisfacer la demanda de los hogares)	INEGI
	Porcentaje de viviendas con piso de tierra	CONAPO

Empleo e ingreso	Porcentaje de la Población Económicamente Activa (PEA) que recibe menos de dos salarios mínimos	CONAPO
	Razón de dependencia (% de población dependiente –menores de 15 años y mayores de 65 años– con relación a la población económicamente productiva)	INEGI
Población	Densidad de población (habitantes por km ²)	INEGI
	Porcentaje de población de habla indígena	INEGI
	Porcentaje de jefas de familia	INEGI
	Dispersión de la población (% de población que habita en localidades menores a 2,500 habitantes)	INEGI

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidas las variables que conforman cada tema, se procedió a generar una base de datos donde se obtuvieron los porcentajes de cobertura y/o atención de cada uno de los indicadores seleccionados. Las fuentes de información de estos datos fueron las siguientes: el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, el Índice de marginación de CONAPO, 2010 y el Sistema Nacional de Información en Salud de la Secretaría de Salud, 2010. Es importante señalar que en el caso de la variable “Tasa de mortalidad infantil”, se utilizaron los datos del índice de marginación de 2000, dado que la CONAPO ya no incluyó dicha variable en la construcción del índice del 2010.

Al porcentaje de cobertura de cada indicador se le otorga una calificación que señala su condición de vulnerabilidad. En general, se efectúa el siguiente procedimiento para obtener dicha calificación en todos los indicadores:

- 1) A partir del porcentaje de cobertura de cada indicador, se registran los valores mayor y menor para determinar el rango existente entre ambos.
- 2) Posteriormente, se divide este rango entre el número de categorías en que se demarca la condición de vulnerabilidad (cinco en este caso) y, con ello, se obtiene el valor que definirá el intervalo o amplitud de cada nivel de vulnerabilidad.
- 3) El margen que incluye la primera condición de vulnerabilidad se obtiene de la siguiente manera: el valor más bajo (o punto de partida) corresponde al promedio menor obtenido, y su límite superior se determina sumándole el valor del intervalo obtenido en el paso anterior. En los casos donde la variable indica una carencia de la población (por ejemplo: déficit en el acceso al agua potable), el valor encontrado equivale a una mayor vulnerabilidad, mientras que en los casos donde la variable refleja un logro o satisfacción de la población (por ejemplo, grado promedio de escolaridad), entonces el valor encontrado equivale a una menor vulnerabilidad. De esta manera, se construyen los valores extremos de la vulnerabilidad: “Muy Alta” o “Muy Baja”.

- 4) Para la construcción de los intervalos de las condiciones de vulnerabilidad intermedias, es decir, los rangos considerados como baja, media y alta, el procedimiento es el siguiente: al valor más alto de la condición de vulnerabilidad inmediatamente anterior, se le suma una milésima (0.001) y el resultado constituye el límite inferior de la condición de vulnerabilidad en construcción. Posteriormente, a dicho valor se le suma el intervalo y así se obtiene el límite superior de dicha condición; este procedimiento se repite para obtener el siguiente rango.
- 5) Finalmente, una vez clasificados los indicadores, se les asigna una calificación que va del 1.00 (“Muy Alta Vulnerabilidad”) al 0.20 (“Muy Baja Vulnerabilidad”), de acuerdo con el siguiente criterio basado en rangos:

Cuadro 1.3. Calificación de la condición de vulnerabilidad social.

Condición de Vulnerabilidad Social	Calificación
Muy Alta	1.00 y más
Alta	0.80
Media	0.60
Baja	0.40
Muy Baja	0.20

A manera de ejemplo, se muestra el siguiente cuadro donde se observa el desarrollo de este procedimiento metodológico.

Cuadro 1.4. Ejemplo de construcción de indicadores.

Tema		Empleo e ingreso		Educación	
Variable	Población ocupada, con ingreso de hasta dos SMM	Razón de dependencia	Población analfabeta	Grado de escolaridad	
Valor Menor	6.40	35.90	0.558	2.03	
Valor Mayor	98.88	137.76	66.547	13.52	
Rango (mayor-menor)	92.48	101.86	65.989	11.49	
Intervalo (rango dividido entre 5)	18.49	20.37	13.198	2.298	
Condición de vulnerabilidad	Calificación	Rangos	Rangos	Rangos	Rangos
Muy Alta	1.0	80.397 - 98.893	117.391 - 137.762	53.350 - 66.547	2.030 - 4.328
Alta	0.8	61.900 - 80.396	97.019 - 117.390	40.152 - 53.349	4.329 - 6.627
Media	0.6	43.394 - 61.890	76.647 - 97.018	26.954 - 40.151	6.628 - 8.926
Baja	0.4	24.897 - 43.393	56.275 - 76.646	13.756 - 26.953	8.927 - 11.225
Muy Baja	0.2	6.400 - 24.896	35.903 - 56.274	0.558 - 13.755	11.226 - 13.523



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Dicho procedimiento es la regla general para la mayoría de los indicadores; sin embargo, existen tres excepciones donde la definición de los rangos no sigue una metodología preestablecida, sino que se plantea de acuerdo con la definición de los especialistas en la materia. Es el caso de las siguientes variables: “Proporción de médicos por cada 1,000 habitantes” y “Densidad poblacional y porcentaje de hablantes indígenas”. Por ejemplo, en lo relativo al indicador de salud, los rangos se construyeron a partir del criterio definido por la Secretaría de Salud, la cual indica como aceptable que haya un médico por cada 1,000 habitantes; por tanto, todos los municipios que cumplen con esa condición o la rebasan, fueron clasificados con muy baja vulnerabilidad social; el resto fueron ubicados en los rangos correspondientes.

CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES DE VULNERABILIDAD TEMÁTICA

Una vez clasificados los indicadores, se obtienen los índices de vulnerabilidad de los temas contemplados: Salud, Escolaridad, Empleo e Ingreso, Vivienda y Población, mediante el promedio de las calificaciones de los indicadores que los conforman.

En esta nueva versión del IVS, los indicadores se ponderaron de manera distinta a la efectuada en el escrito publicado en 2010. En aquella ocasión casi todos los indicadores tenían el mismo peso (1.0) en la construcción de los índices temáticos; sólo hubo dos excepciones: una en el índice de educación y otra en el de empleo e ingreso. Luego de reflexionar sobre el papel que tiene cada indicador en la conformación de la vulnerabilidad social y de la capacidad de respuesta de la población frente a los eventos meteorológicos, se decidió ponderar de manera diferenciada el peso específico de cada indicador en la conformación de los índices de vulnerabilidad temáticos, a fin de reflejar de manera más precisa las condiciones de vulnerabilidad en que se encuentran los municipios del país. Como resultado de dicho análisis, la asignación del peso específico de cada indicador varió en los ejes temáticos. Por ejemplo, en el tema de Salud, los indicadores “Proporción de médicos por cada 1,000 habitantes” y “Porcentaje de población no derechohabiente” pesaron el doble que “Tasa de mortalidad infantil”, dado que las dos primeras variables (que señalan la disponibilidad y acceso a los servicios médicos) tienen mayor influencia en la conformación de la vulnerabilidad.

A continuación se presenta un cuadro comparativo entre el IVS elaborado en el 2010 y el IVS luego desarrollado en 2014. En la tabla se indica el peso específico asignado a cada indicador en la construcción de los cinco índices temáticos, así como las razones por las que se calificó con mayor peso a los indicadores correspondientes.

CONSTRUCCIÓN DEL IVS DEFINITIVO

Para elaborar el IVS definitivo se siguió el procedimiento siguiente: en primer lugar, se promedian las calificaciones de los cinco índices temáticos; en segundo lugar, al valor obtenido se le aplica el mismo procedimiento descrito para definir la condición de vulnerabilidad de los indicadores (abordado en el primer apartado de esta sección).

Cuadro 1.5. Comparación del peso específico de los indicadores utilizados en la construcción de los IVS del 2010 y del 2014.

Tema	Indicadores	Ponderación 2010	Ponderación 2014	Observaciones
Salud	Proporción de médicos por cada 1,000 habitantes	1.0	2.0	Al analizar casos donde se han presentado desastres como consecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, se ha notado que los dos factores fundamentales que inciden en el incremento de la vulnerabilidad en el ámbito local son: a) la falta de médicos y b) la carencia de instituciones que brinden servicios médicos localmente como el IMSS, ISSSTE y Seguro Popular, entre otros. Por esta razón, se otorgó una ponderación más elevada a estas variables, a fin de reflejar su papel diferenciado en la construcción de la vulnerabilidad.
	Tasa de mortalidad infantil	1.0	1.0	
	Porcentaje de población no derechohabiente	1.0	2.0	
Educación	Porcentaje de analfabetismo	0.5	1.0	En la actualidad, ante los bajos porcentajes de analfabetismo en el país, esta variable no impacta en la construcción de la vulnerabilidad. Es más relevante acceder a un mayor grado de escolaridad, dado que brinda oportunidad de contar con mayor información sobre riesgos de desastres; ello proporciona mayor capacidad de respuesta y mejor posibilidad de actuar en procesos de prevención de riesgos.
	Grado promedio de escolaridad	1.0	2.0	
Vivienda	Porcentaje de viviendas sin agua entubada	1.0	2.0	Dado que existe una estrecha correlación entre la ausencia de los servicios de agua y alcantarillado con la presencia de enfermedades de origen hídrico, se le otorgó mayor peso a las variables que señalan la falta de acceso a los servicios de agua entubada y drenaje. Con ello, se resalta la importancia de estos servicios en la conformación de la vulnerabilidad social en la vivienda.
	Porcentaje de viviendas sin drenaje	1.0	2.0	
	Déficit de vivienda	1.0	1.0	
	Porcentaje de viviendas con piso de tierra	1.0	1.0	
Empleo e ingreso	Porcentaje de la PEA que recibe menos de dos salarios mínimos	1.0	2.0	Hoy por hoy, la realidad laboral está cambiando en México. Ahora es menos importante la edad de entrada y retiro al mercado laboral. Por ello, se le dio más relevancia al ingreso salarial que a la razón de dependencia. Actualmente, los mexicanos y mexicanas ingresan más jóvenes a trabajar y se retiran con mayor edad. Por otro lado, contar con mayores ingresos brinda a las familias una mayor capacidad de resiliencia para recuperarse de los desastres.
	Razón de dependencia	0.5	1.0	
Población	Densidad de población (habitantes por km ²)	1.0	1.0	El peso específico de estos indicadores se mantuvo con relación al establecido originalmente (todos tienen el mismo peso), dado que estas variables tienen la misma relevancia en la construcción de la vulnerabilidad.
	Porcentaje de población de habla indígena	1.0	1.0	
	Porcentaje de jefas de familia	1.0	1.0	
	Dispersión de la población	1.0	1.0	

Siguiendo el procedimiento anterior, se llega a la definición del IVS definitivo. Con este instrumento se ubican los 2,456 municipios del país en cinco grupos, de acuerdo con su condición de vulnerabilidad. En el cuadro siguiente se observan las cinco condiciones de vulnerabilidad, seguidos de los valores obtenidos luego del proceso metodológico descrito (calificar los indicadores, ponderar su peso específico en la construcción de los índices temáticos y promediar el valor de estos cinco índices).

Cuadro 1.6. Condición de vulnerabilidad social final.

Estadísticos	Valores
Valor menor	0.343
Valor mayor	0.950
Rango (mayor-menor)	0.607
Rango dividido entre 5	0.121
Condición de vulnerabilidad	Rangos
Muy Alta	0.833 - 0.954
Alta	0.710 - 0.832
Media	0.588 - 0.709
Baja	0.466 - 0.587
Muy Baja	0.343 - 0.465

Con esta metodología, se calificó el grado de vulnerabilidad social en que se encuentran todos los municipios de México. Más adelante, se observarán gráficamente los resultados de esta clasificación, mediante de los mapas construidos ex profeso para ilustrar la distribución de la vulnerabilidad social en el país. Para mostrar el tipo de información generada por el IVS, a continuación se expone un cuadro resumen con las entidades federativas que tienen la mayor proporción de municipios en condiciones de Alta y Muy Alta vulnerabilidad social. No es casual, dada la historia de marginación y pobreza en que se encuentran, que en los estados de Guerrero, Chiapas y Oaxaca, más del 75% de sus municipios estén ubicados en las categorías de Alta y Muy Alta vulnerabilidad social.

MAPAS MUNICIPALES CON EL IVS

Una vez elaborado el IVS de cada municipio, se procede a graficar el valor obtenido en el mapa de división municipal del país, mediante el programa de cómputo ArcGis. El resultado de este procedimiento fue la obtención de 21 mapas (uno por cada entidad federativa, otro del Distrito Federal y uno general del país).

Con objeto de lograr una versión del IVS que permitiera una clara visualización de la vulnerabilidad social de los municipios del país, se realizaron varias pruebas en

Cuadro 1.7. Entidades federativas con el mayor porcentaje de municipios en condiciones de Alta y Muy Alta vulnerabilidad social.

Estado	Municipios totales	Alta vulnerabilidad social		Muy Alta vulnerabilidad social		% de municipios con Alta y Muy Alta vulnerabilidad
		Número de municipios	%	Número de municipios	%	
Guerrero	81	34	42.0	32	39.5	81.5
Chiapas	119	68	57.1	24	20.2	77.3
Oaxaca	570	233	40.9	202	35.4	76.3
Puebla	217	119	54.8	27	12.4	67.2
Veracruz	212	86	40.6	34	16	56.6
San Luis Potosí	58	27	46.6	3	5.2	51.8
Yucatán	103	49	47.6	1	1	48.6
Hidalgo	84	24	28.6	4	4.8	33.4
Michoacán	113	37	32.7	0	0	32.7
Chihuahua	67	8	11.9	5	7.5	19.4
Campeche	11	2	18.2	0	0	18.2
Durango	39	4	10.3	1	2.6	12.9
Querétaro	18	2	11.1	0	0	11.1
México	125	13	10.4	0	0	10.4
Nayarit	20	1	5	1	5	10
Tamaulipas	43	4	9.3	0	0	9.3
Morelos	33	3	9.1	0	0	9.1
Jalisco	123	4	3.3	5	4.1	7.4
Zacatecas	58	4	6.9	0	0	6.9
Guanajuato	46	3	6.5	0	0	6.5
Nuevo León	51	3	5.9	0	0	5.9
Sonora	72	2	2.8	0	0	2.8
Coahuila	38	1	2.6	0	0	2.6
Tlaxcala	60	1	1.7	0	0	1.7
Totales	2,361	732		339		

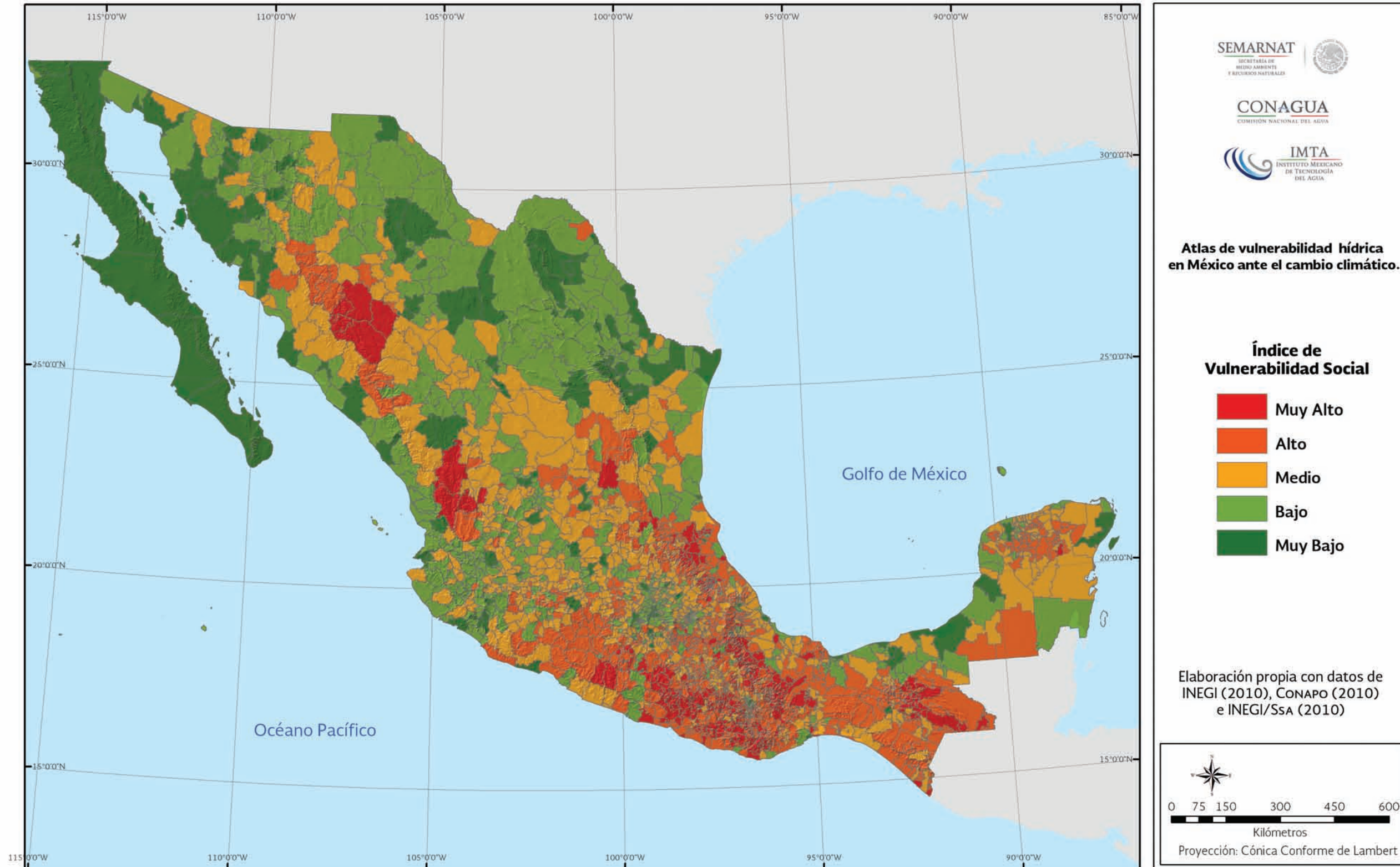
cuanto al número ideal de rangos en los que se dividiría el índice final. Se probó con tres y con cinco niveles de vulnerabilidad, siendo esta última opción la que mejor muestra la diversidad en cuanto a la vulnerabilidad social.

Se decidió presentar los mapas con el IVS de los estados a partir de los siguientes criterios: a) los estados que tienen más municipios se exponen en una hoja por separado y los 12 estados que tienen menor cantidad de municipios se agruparon en cuatro estados por página, y b) la presentación de los estados es de norte a sur.

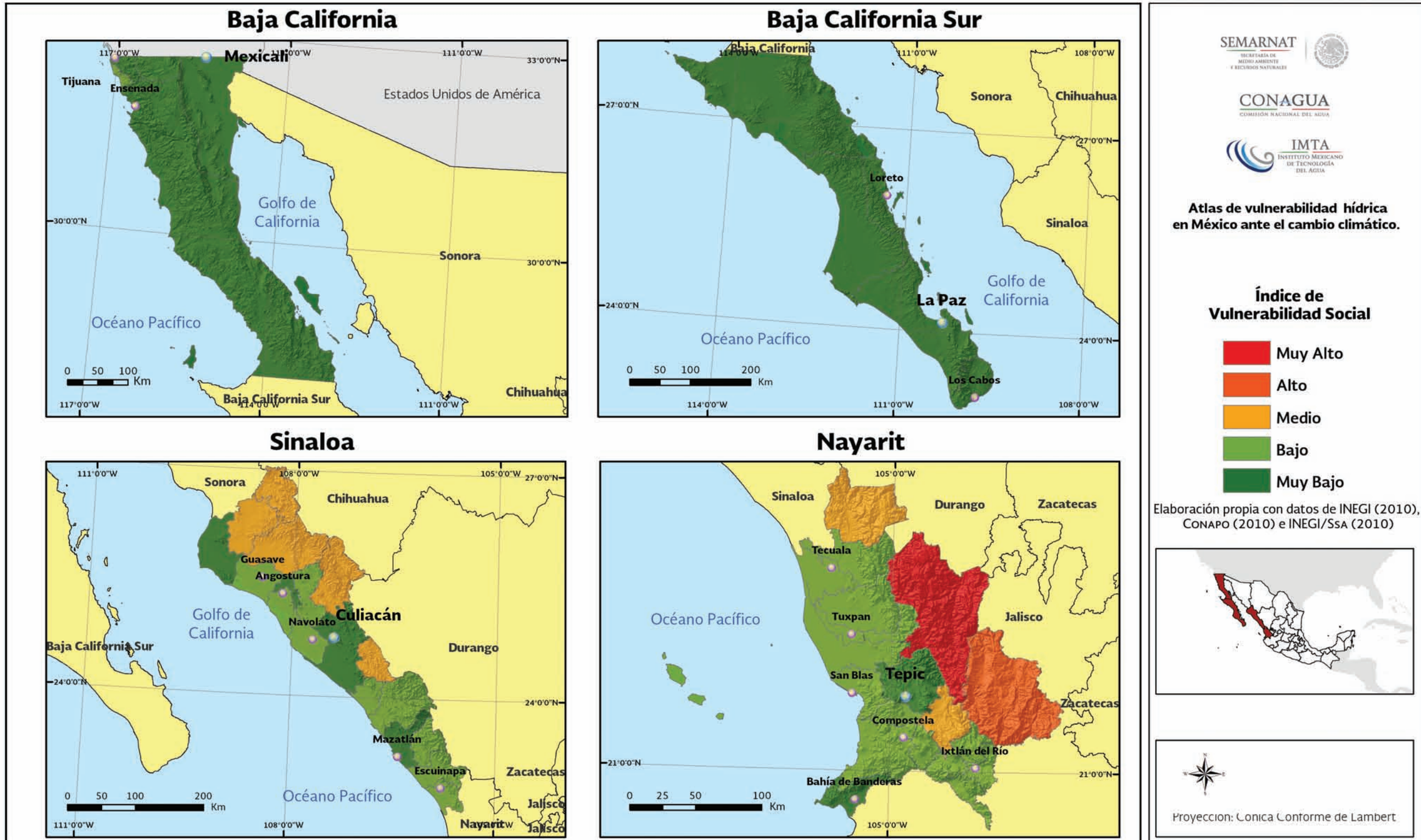
Los mapas generados reflejan los niveles de vulnerabilidad social de cada municipio de la república mexicana y pueden ser un importante insumo para la definición de políticas de combate a la pobreza, de adaptación al cambio climático y de prevención de riesgos de desastres.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO

Mapa 1.1

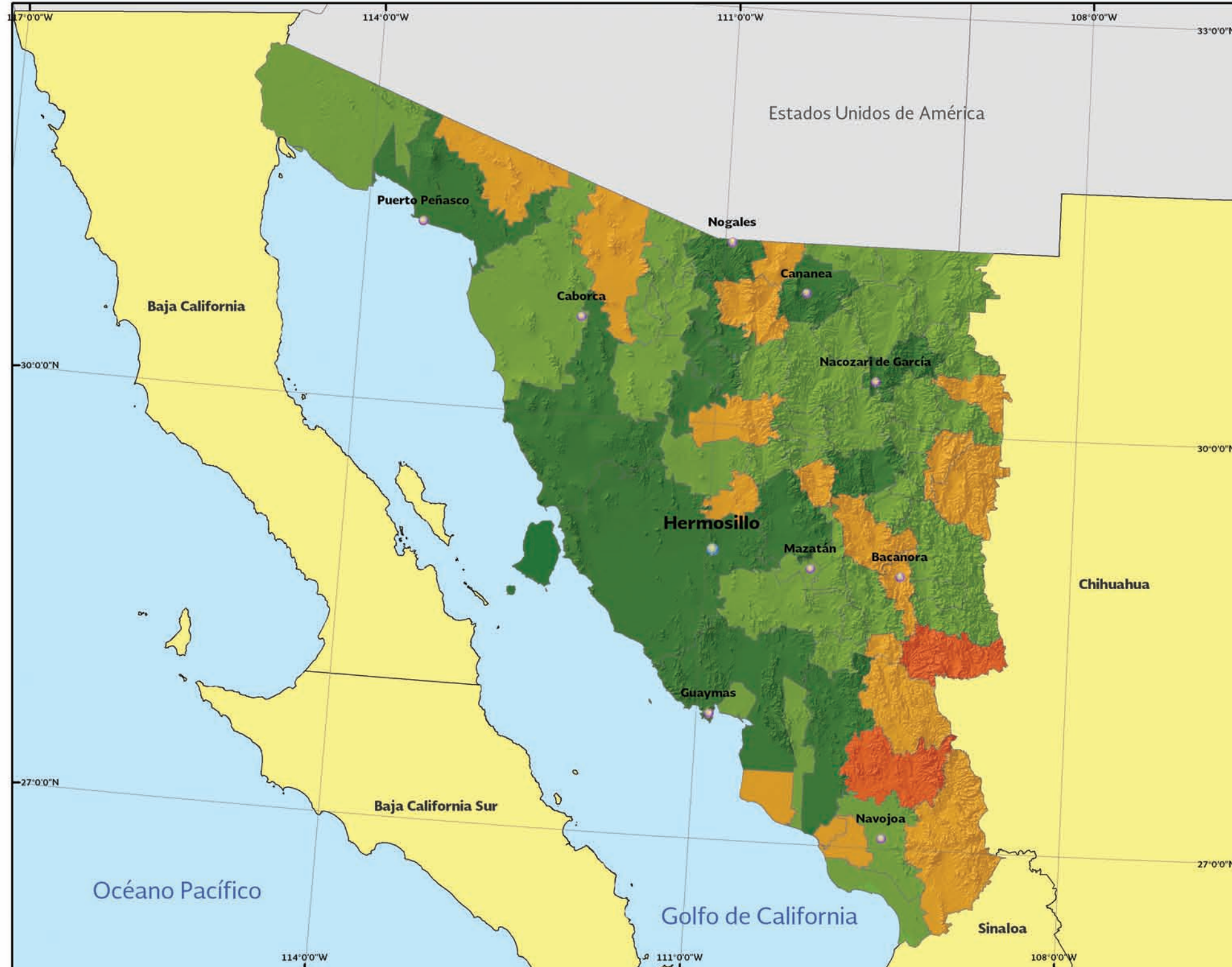


VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO Mapa 1.2



VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: SONORA

Mapa 1.3



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)



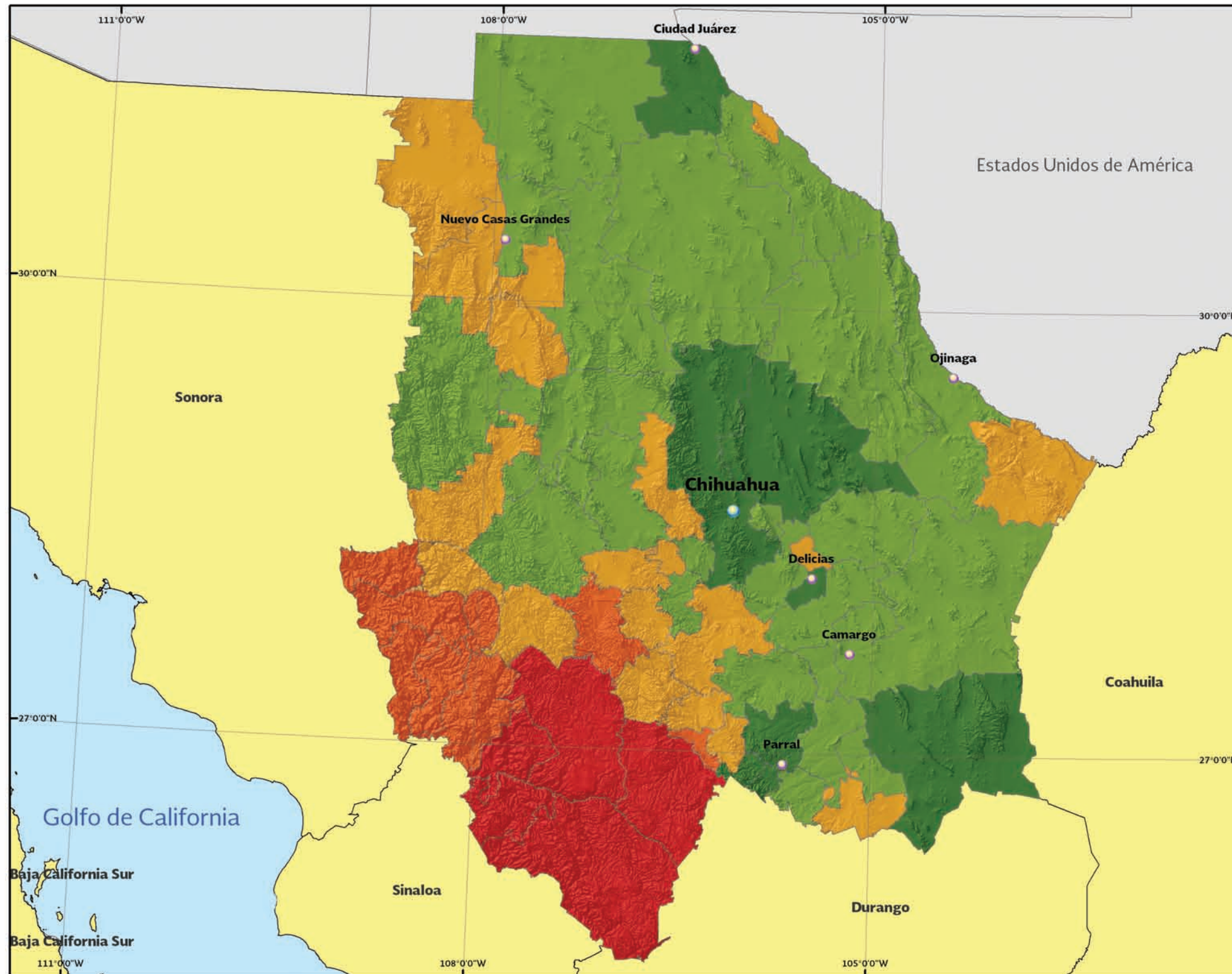
0 100 200

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: CHIHUAHUA

Mapa 1.4



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

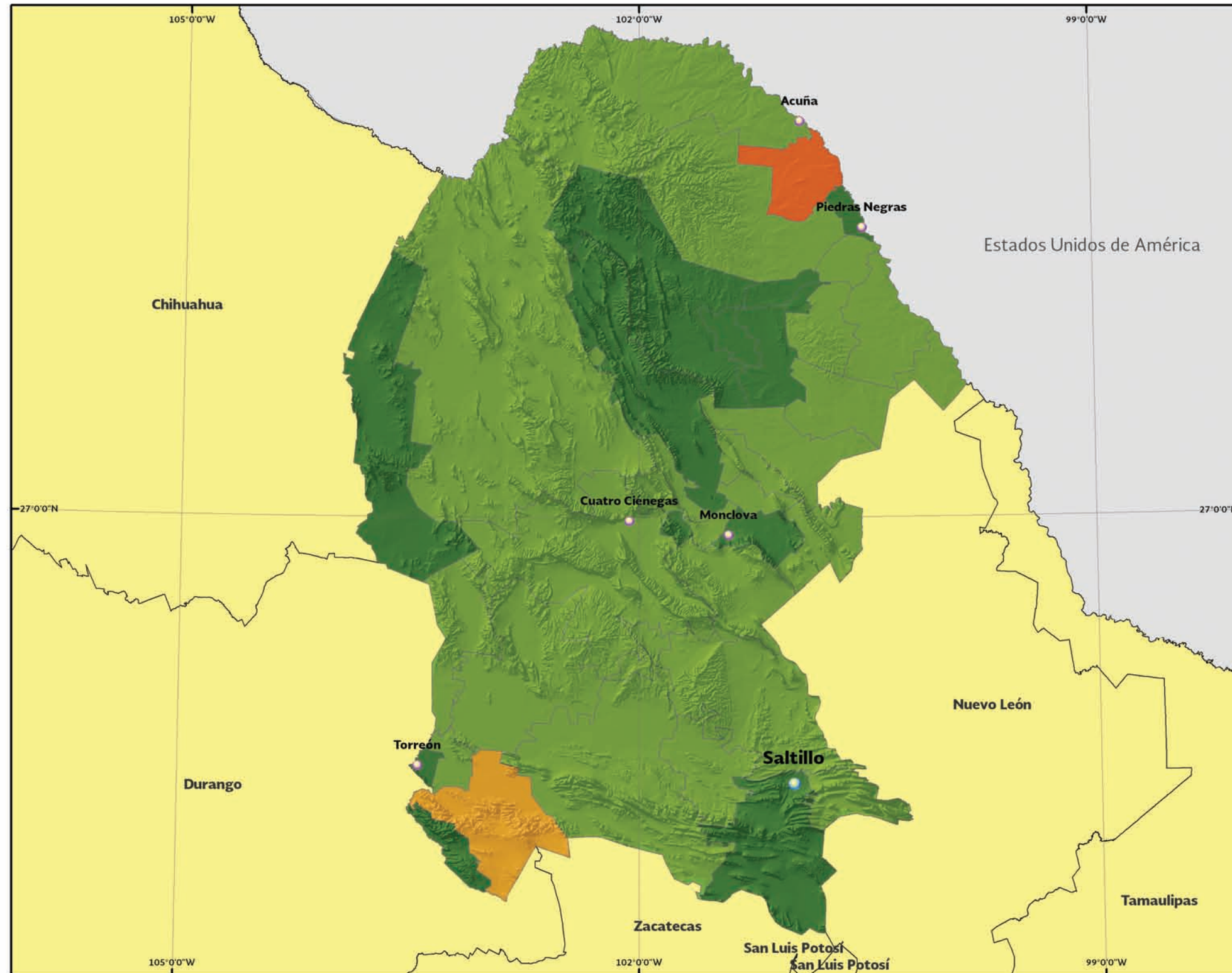
Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

0 100 200 Kilómetros

 Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: COAHUILA

Mapa 1.5



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

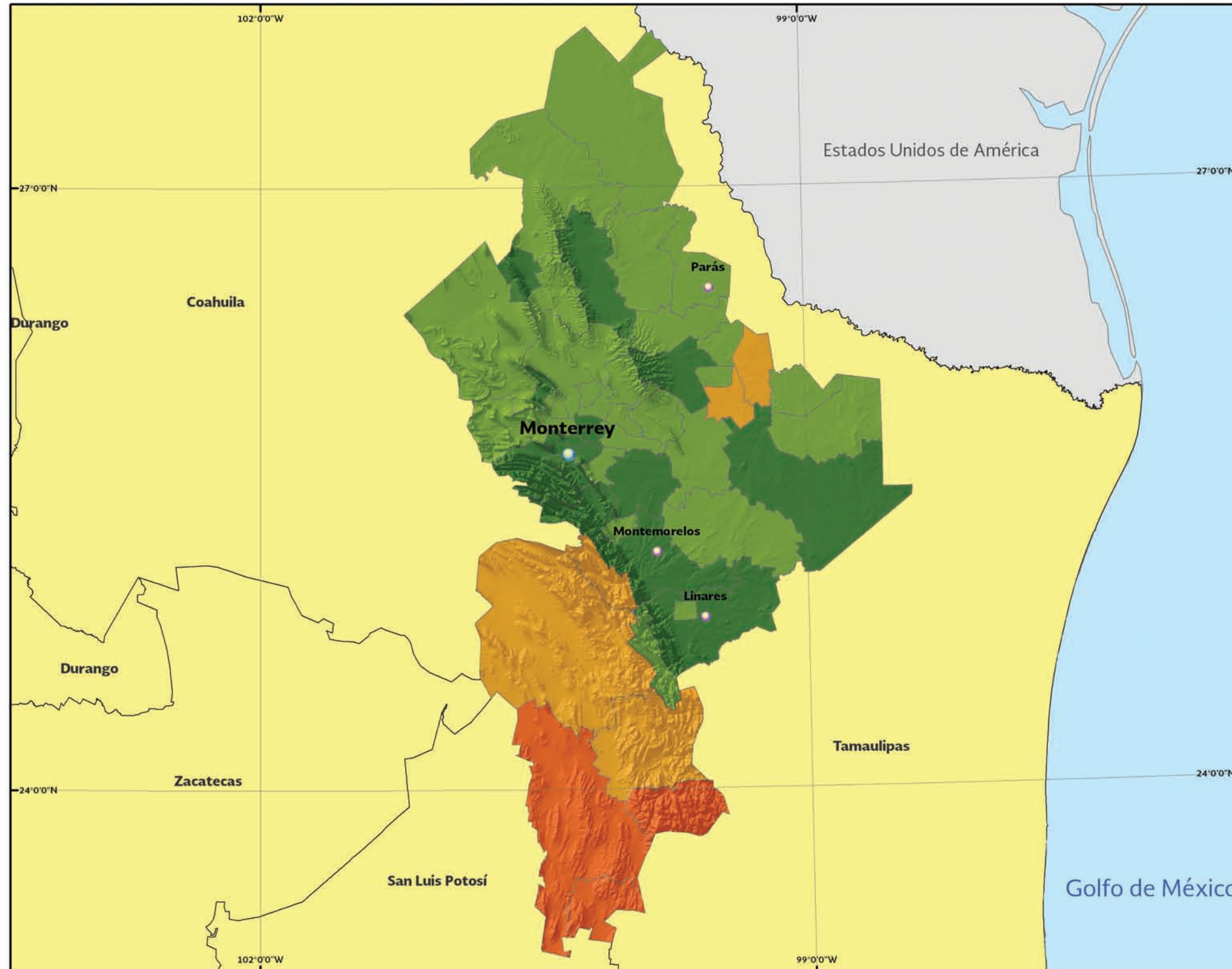


0 50 100
Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: NUEVO LEÓN

Mapa 1.6



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

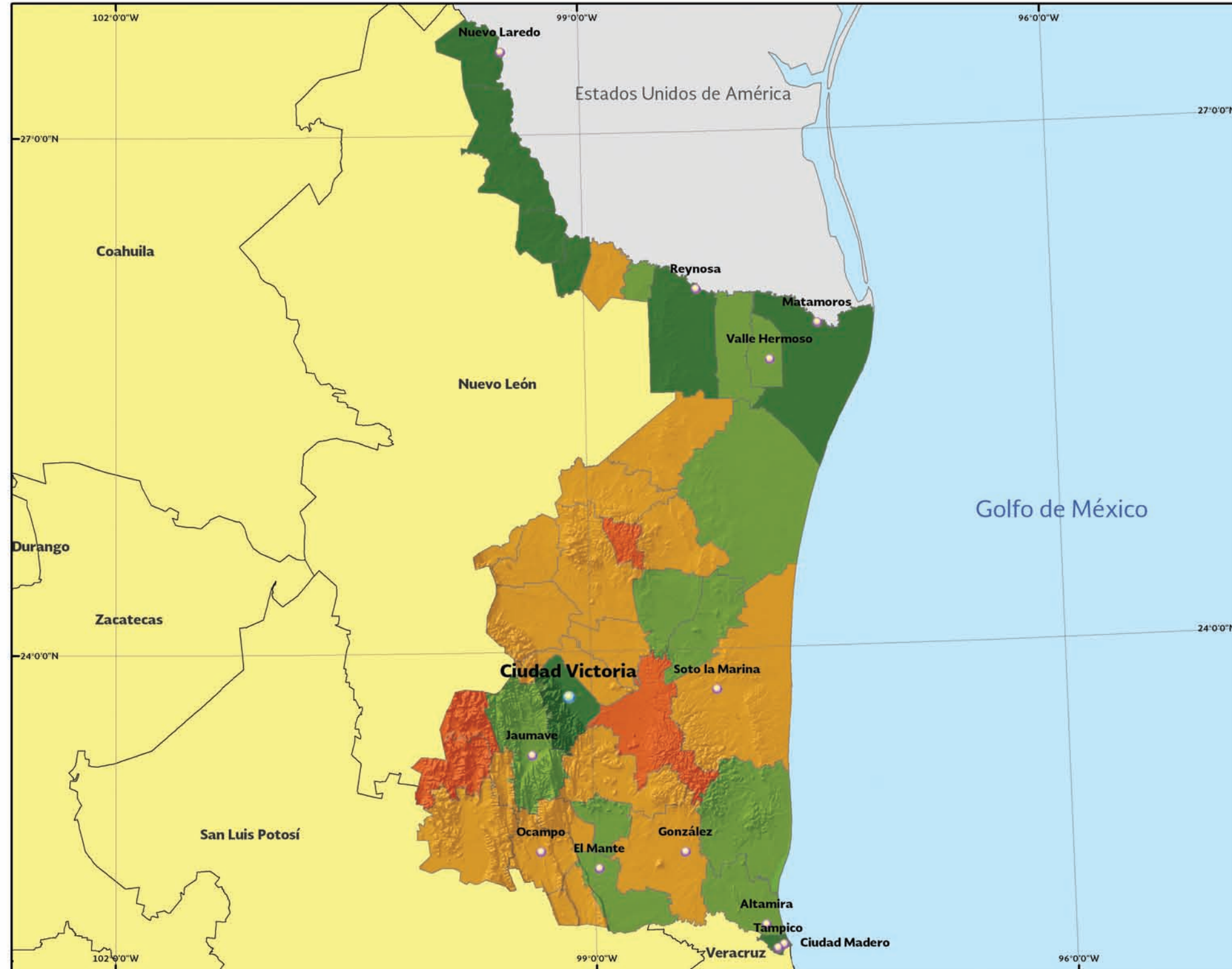
- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: TAMAULIPAS

Mapa 1.7



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/SSA (2010)



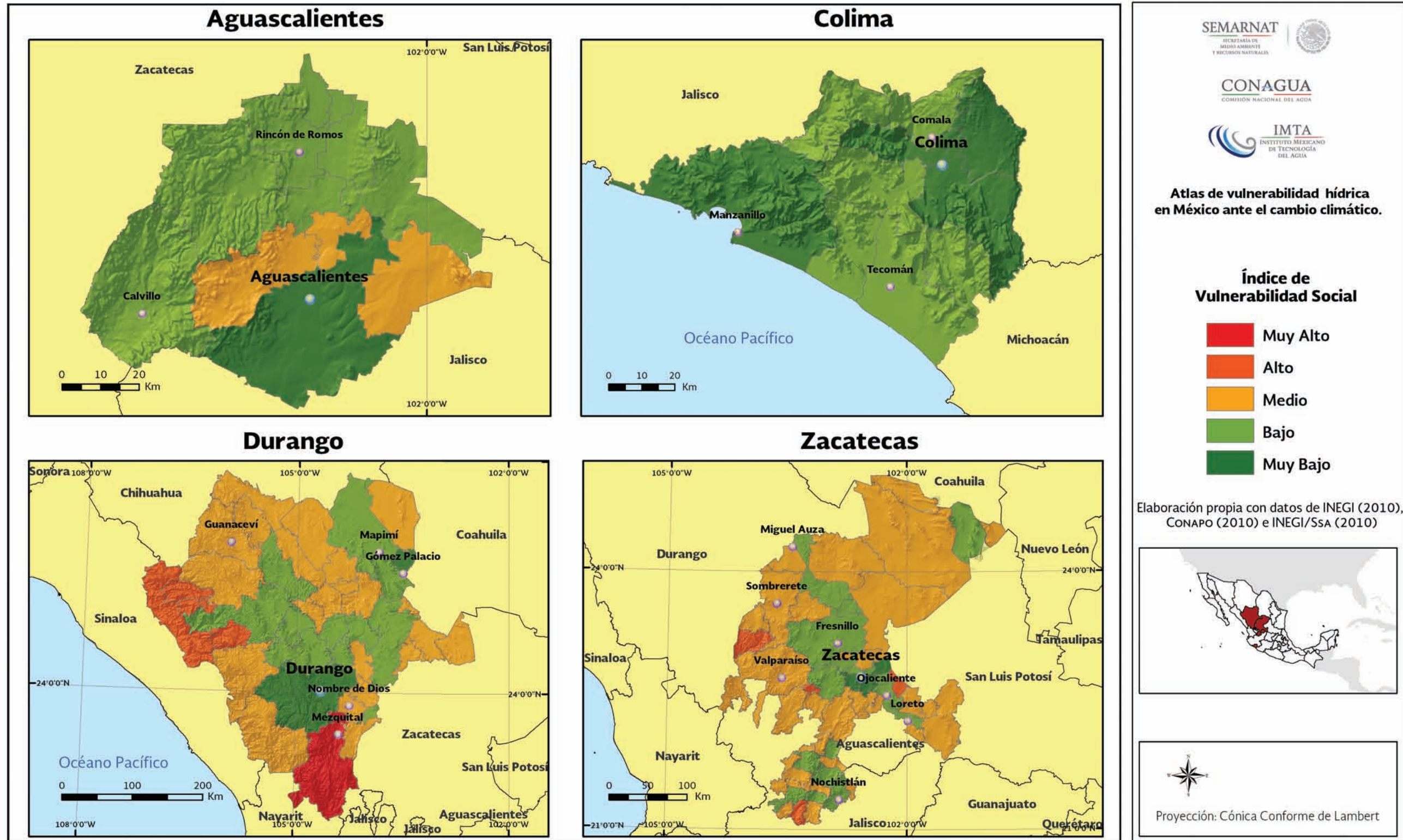
0 50 100

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

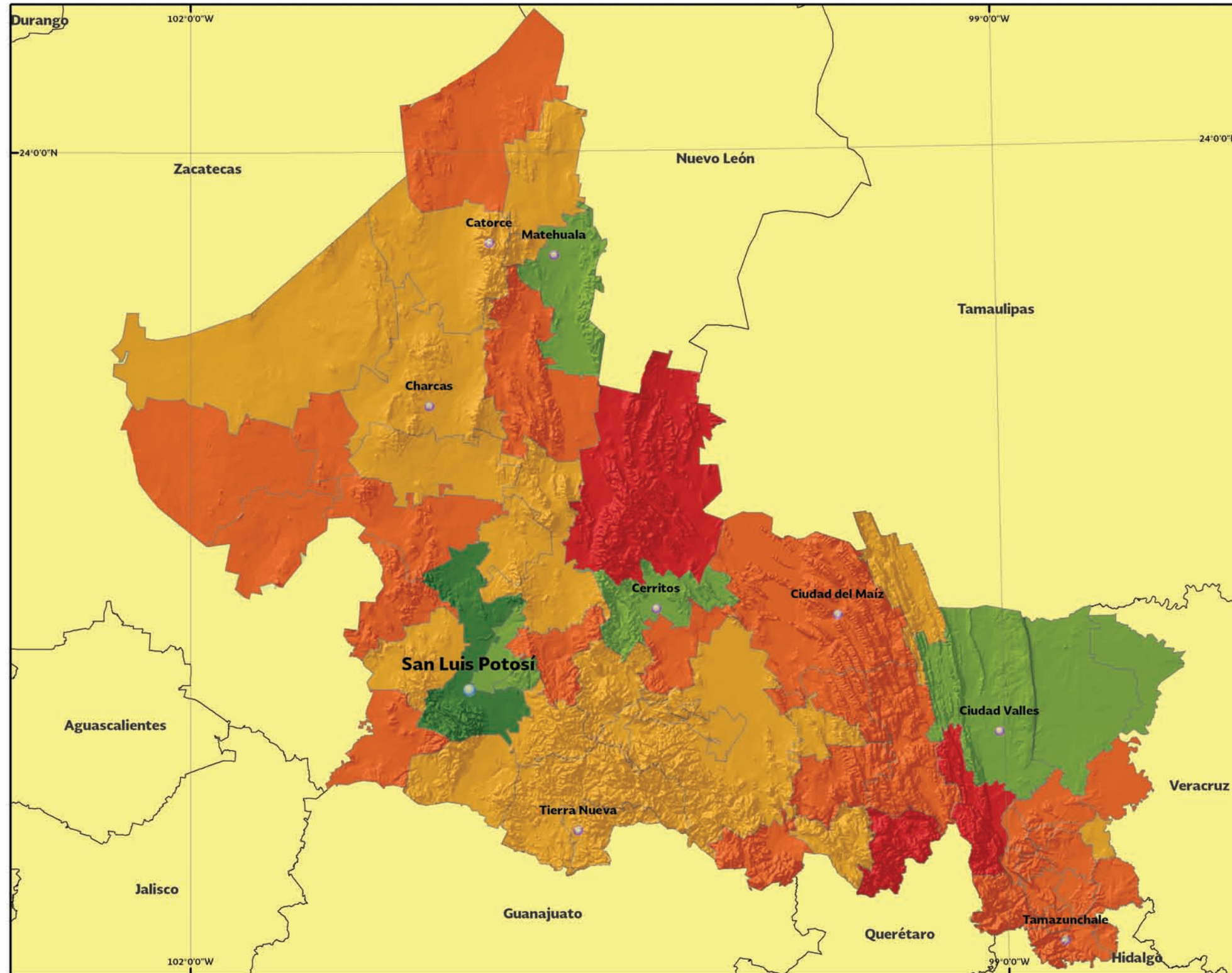
VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO

Mapa 1.8



VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: SAN LUIS POTOSÍ

Mapa 1.9

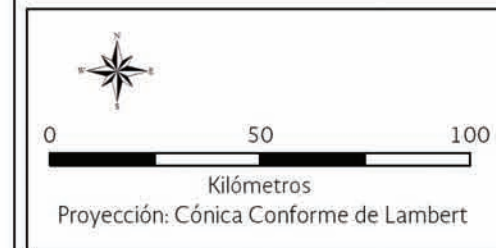


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

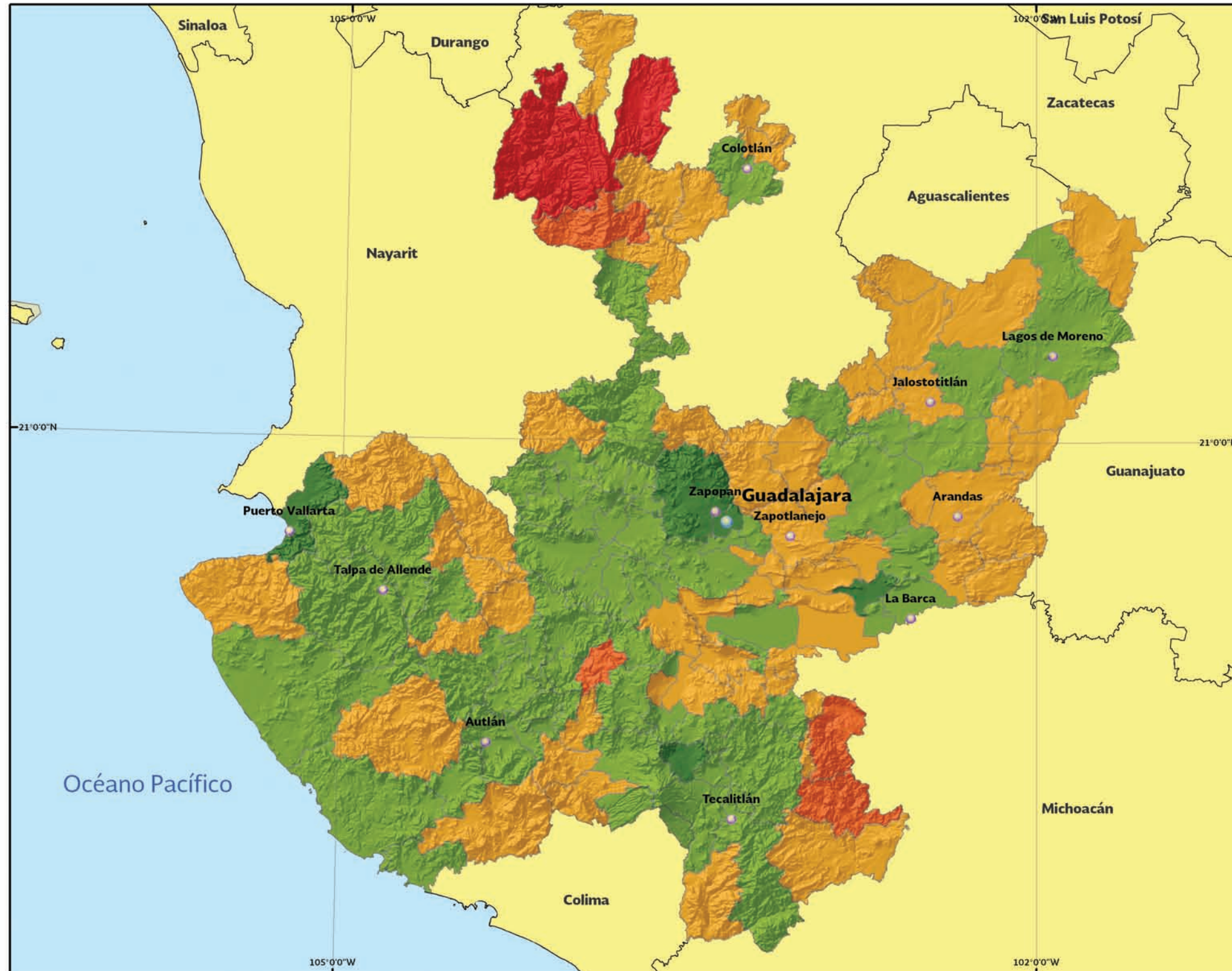
- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo




Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/SSA (2010)



VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: JALISCO

Mapa 1.10








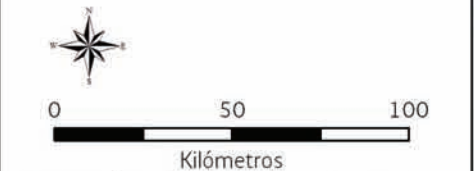
Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

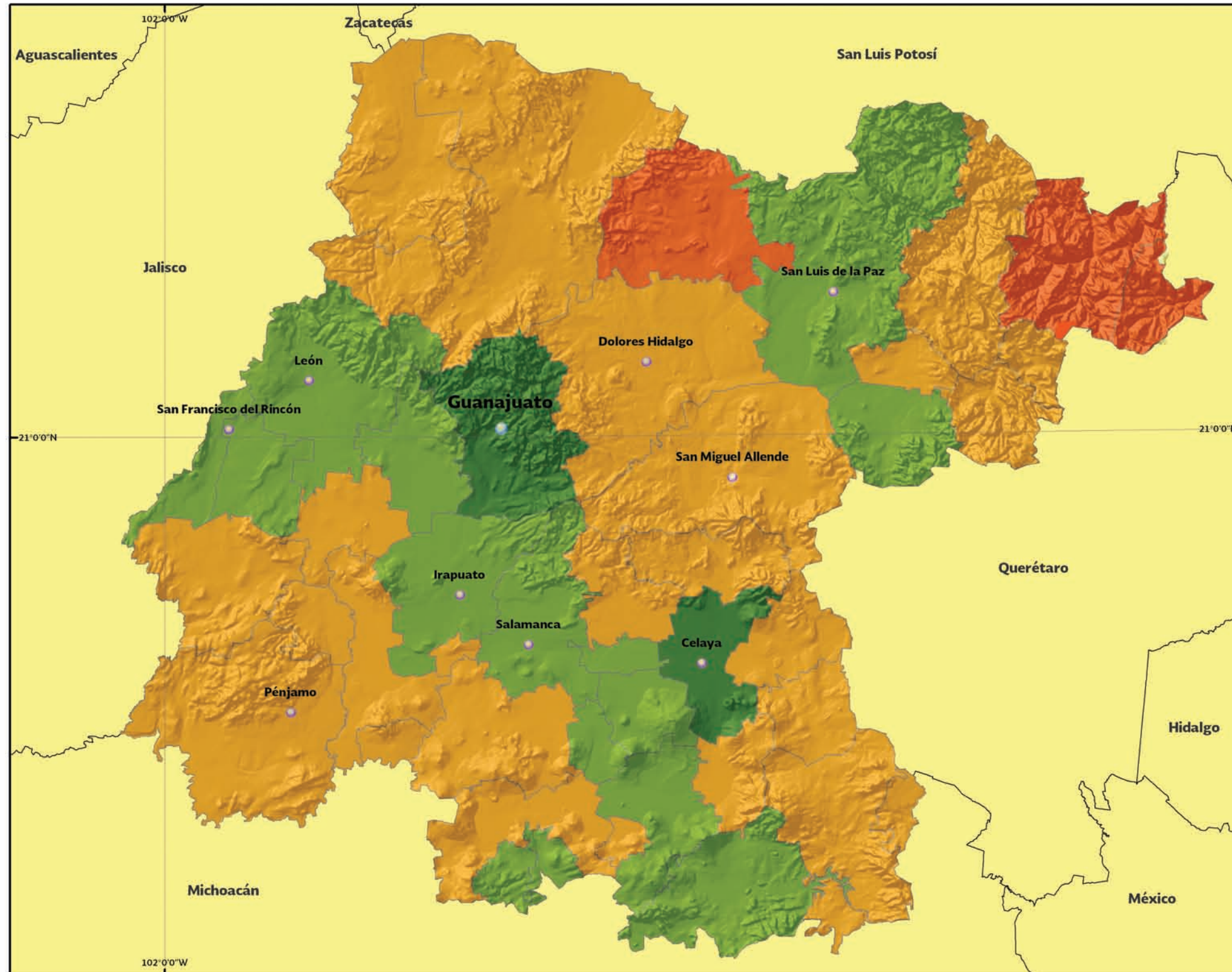




Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: GUANAJUATO

Mapa 1.11



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

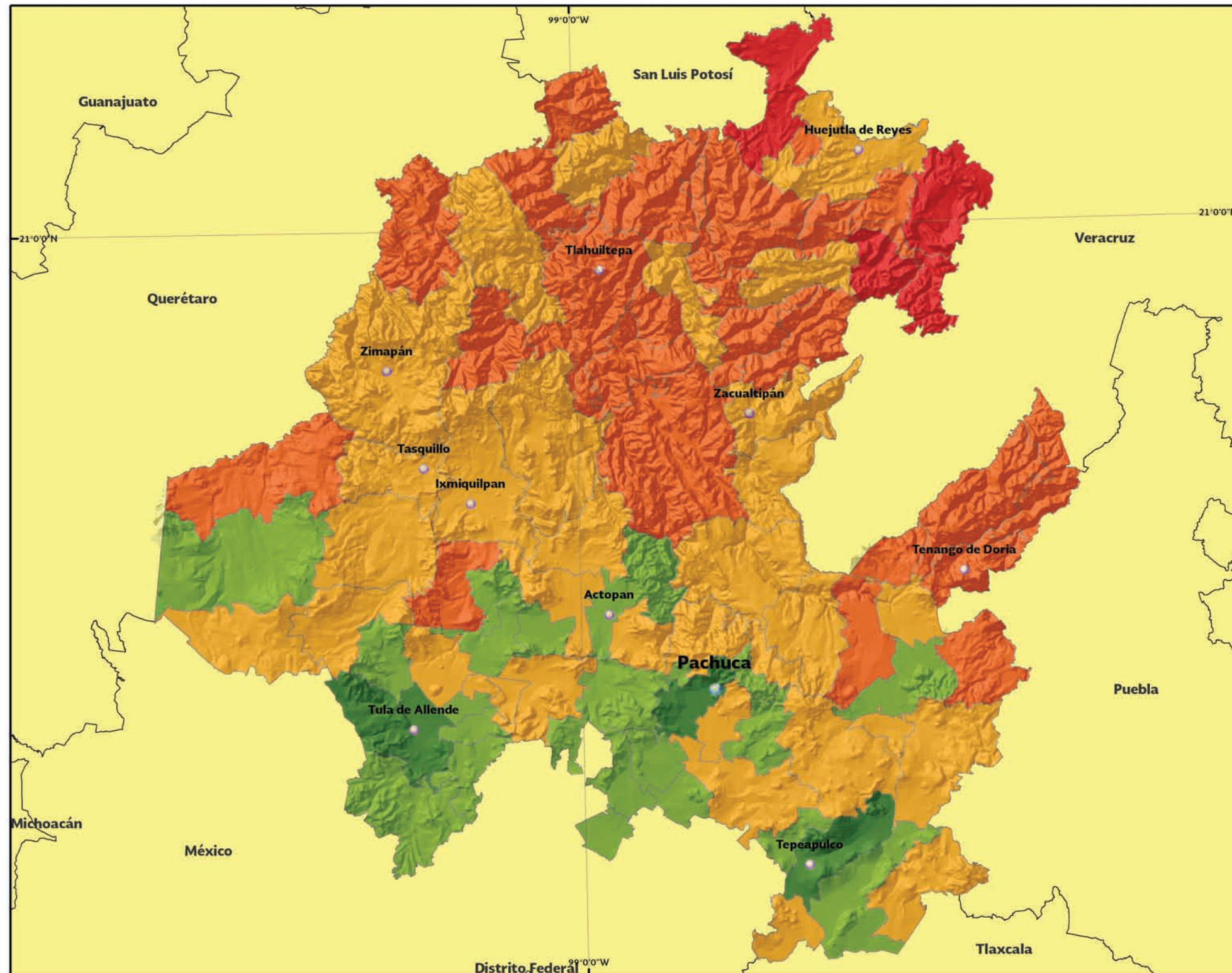


0 25 50
Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: HIDALGO

Mapa 1.12



SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

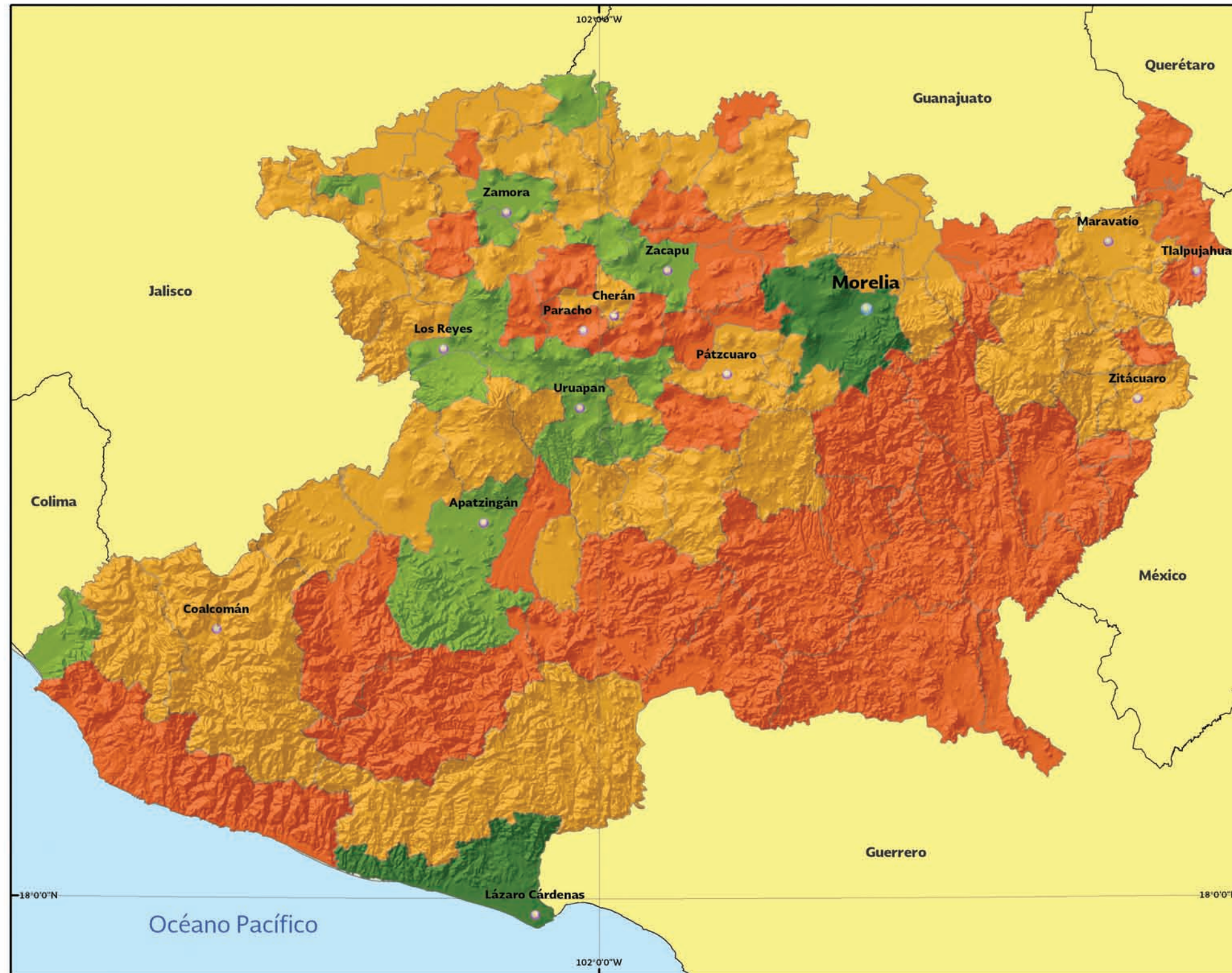
- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

0 25 50
Kilómetros
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: MICHOACÁN

Mapa 1.13



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

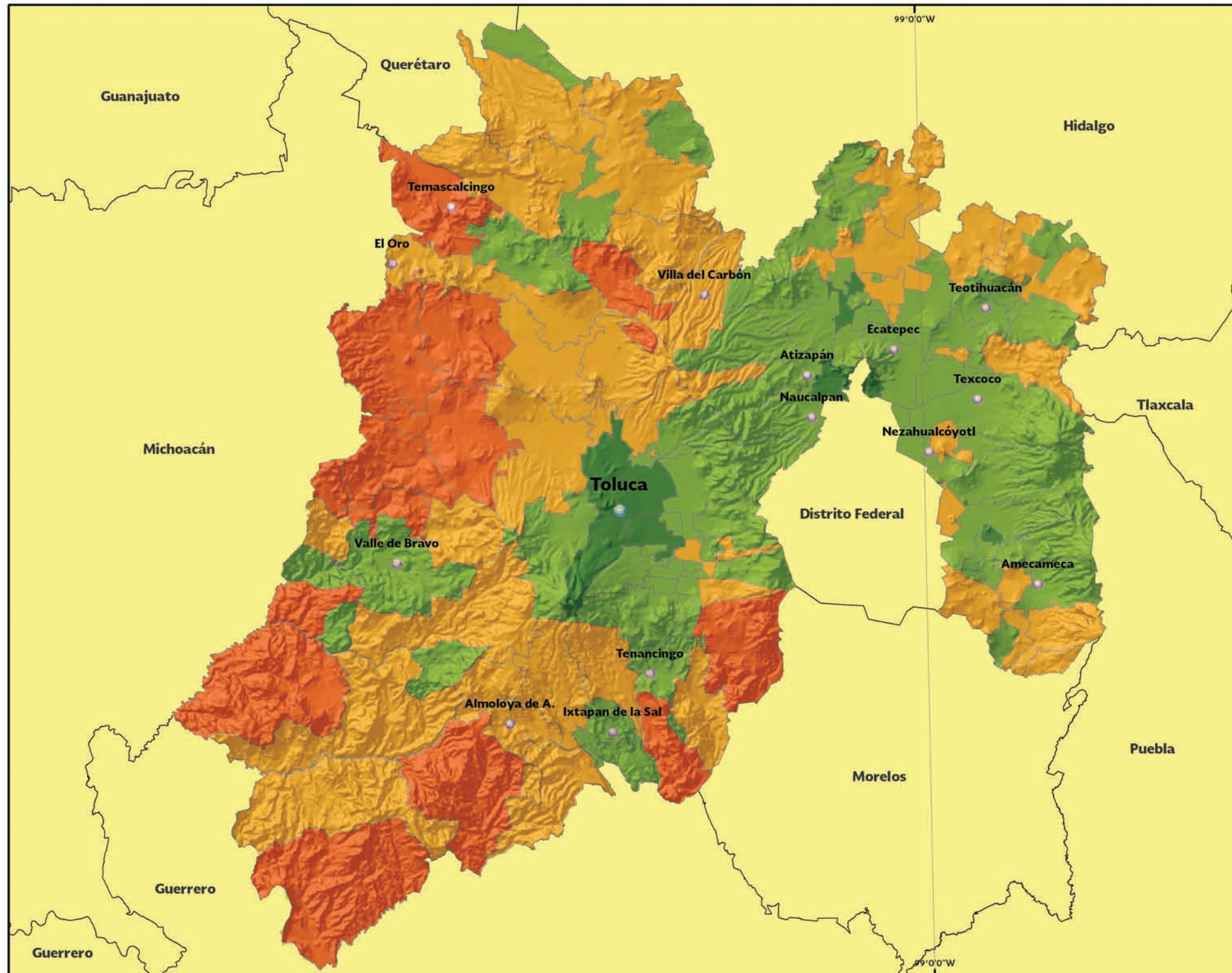


0 25 50
Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: ESTADO DE MÉXICO

Mapa 1.14



SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

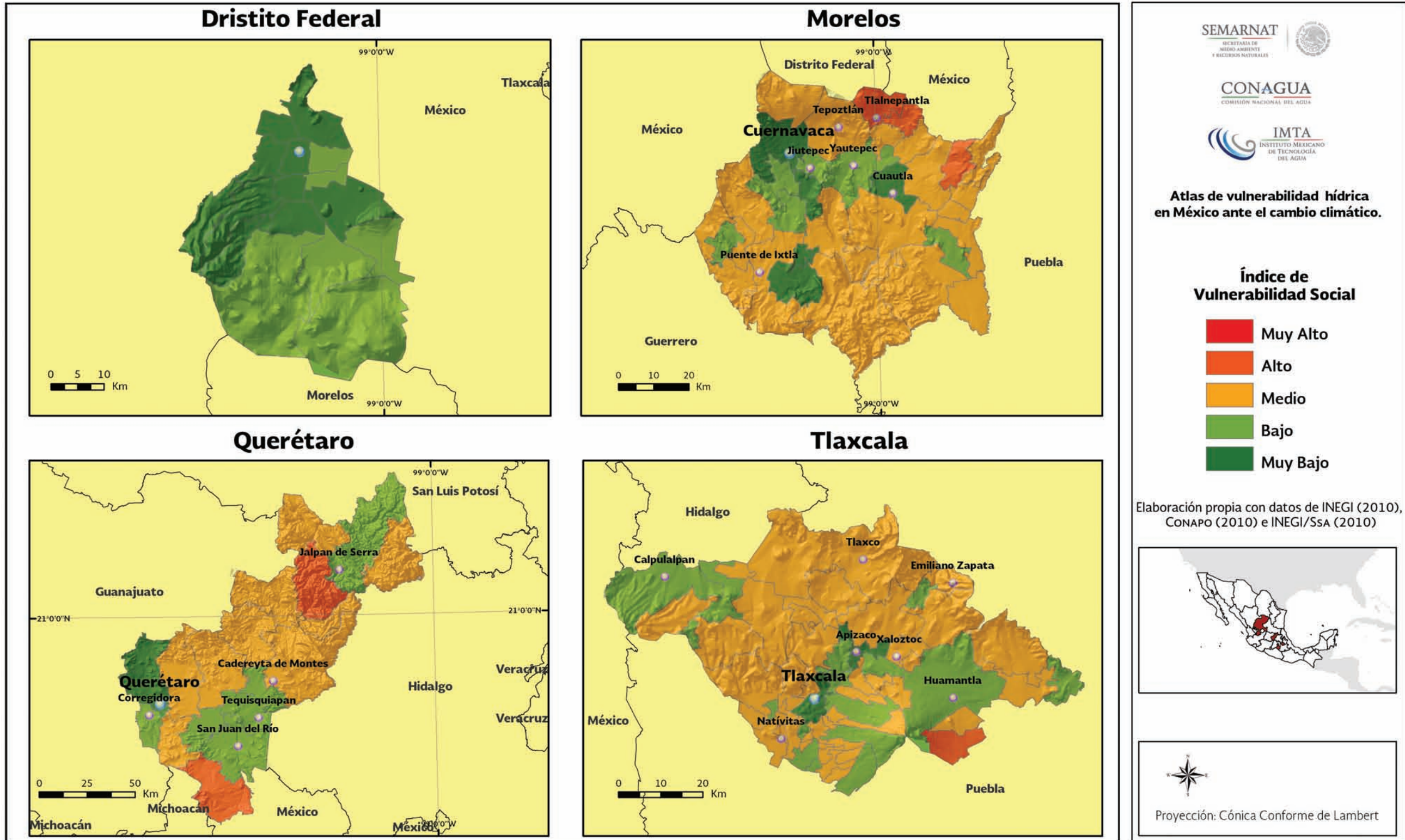
- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

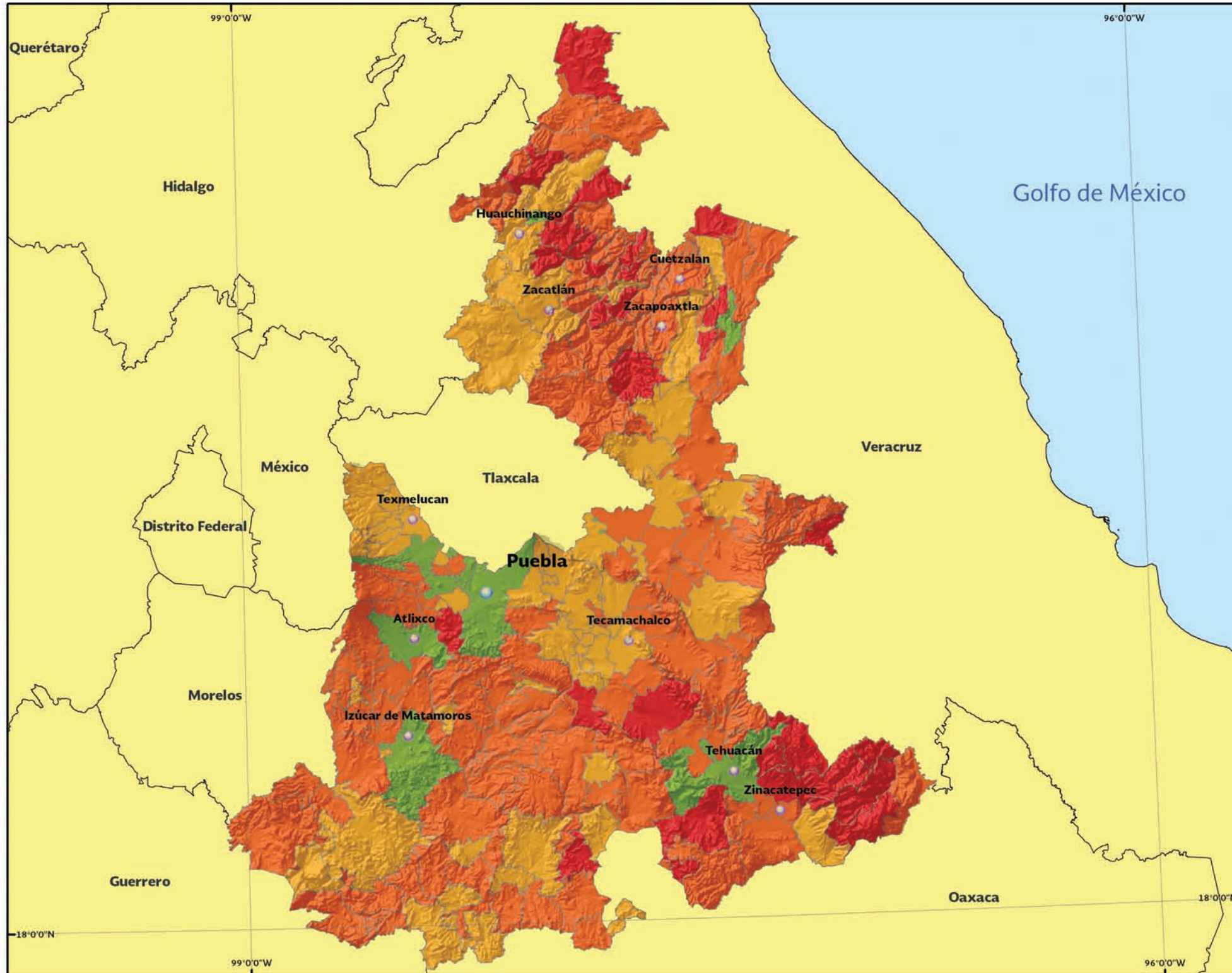
VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO

Mapa 1.15



VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: PUEBLA

Mapa 1.16



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

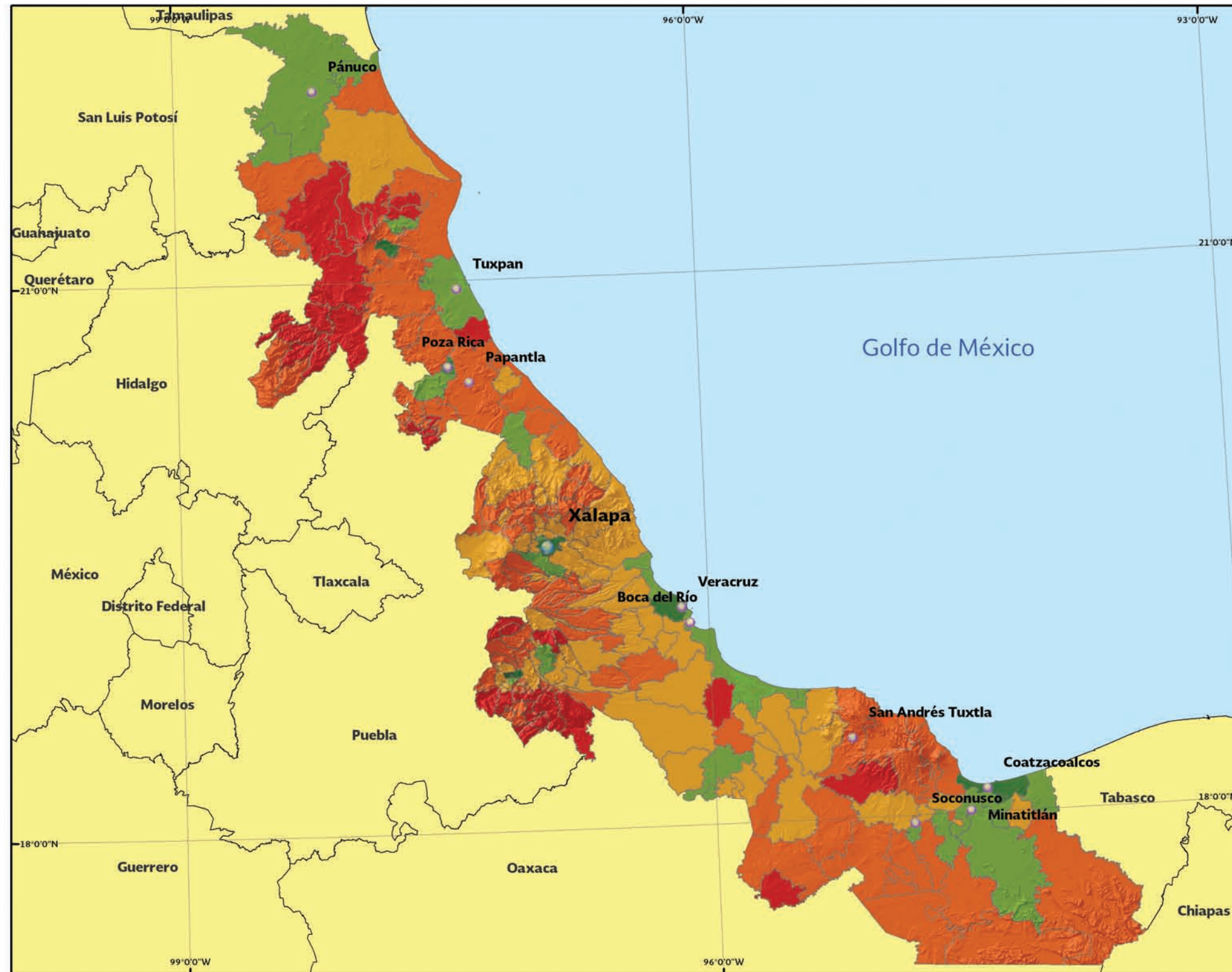


0 25 50

Kilómetros
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: VERACRUZ

Mapa 1.17



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/SSa (2010)



0 50 100

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: GUERRERO

Mapa 1.18



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

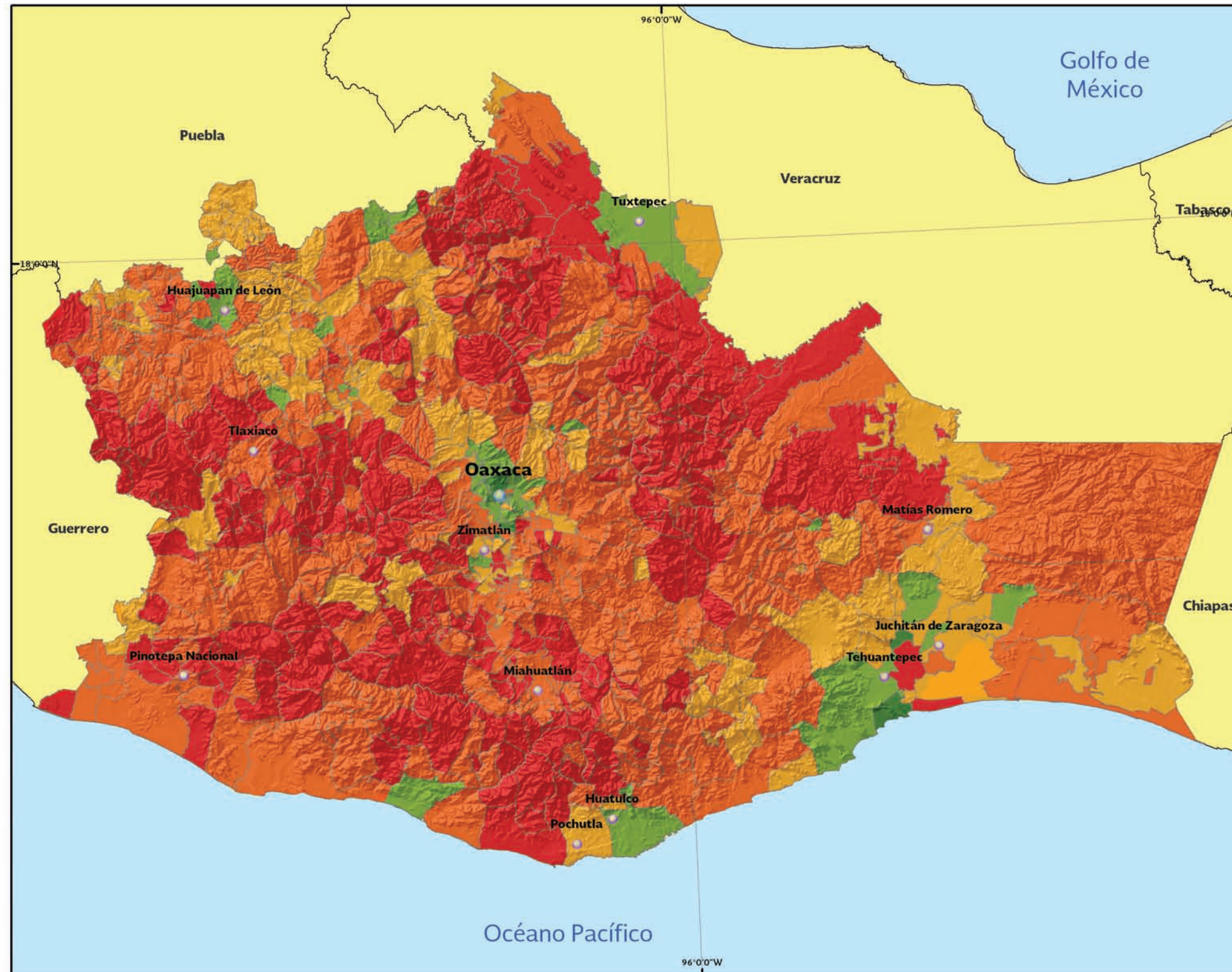
Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)



Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: OAXACA

Mapa 1.19



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)



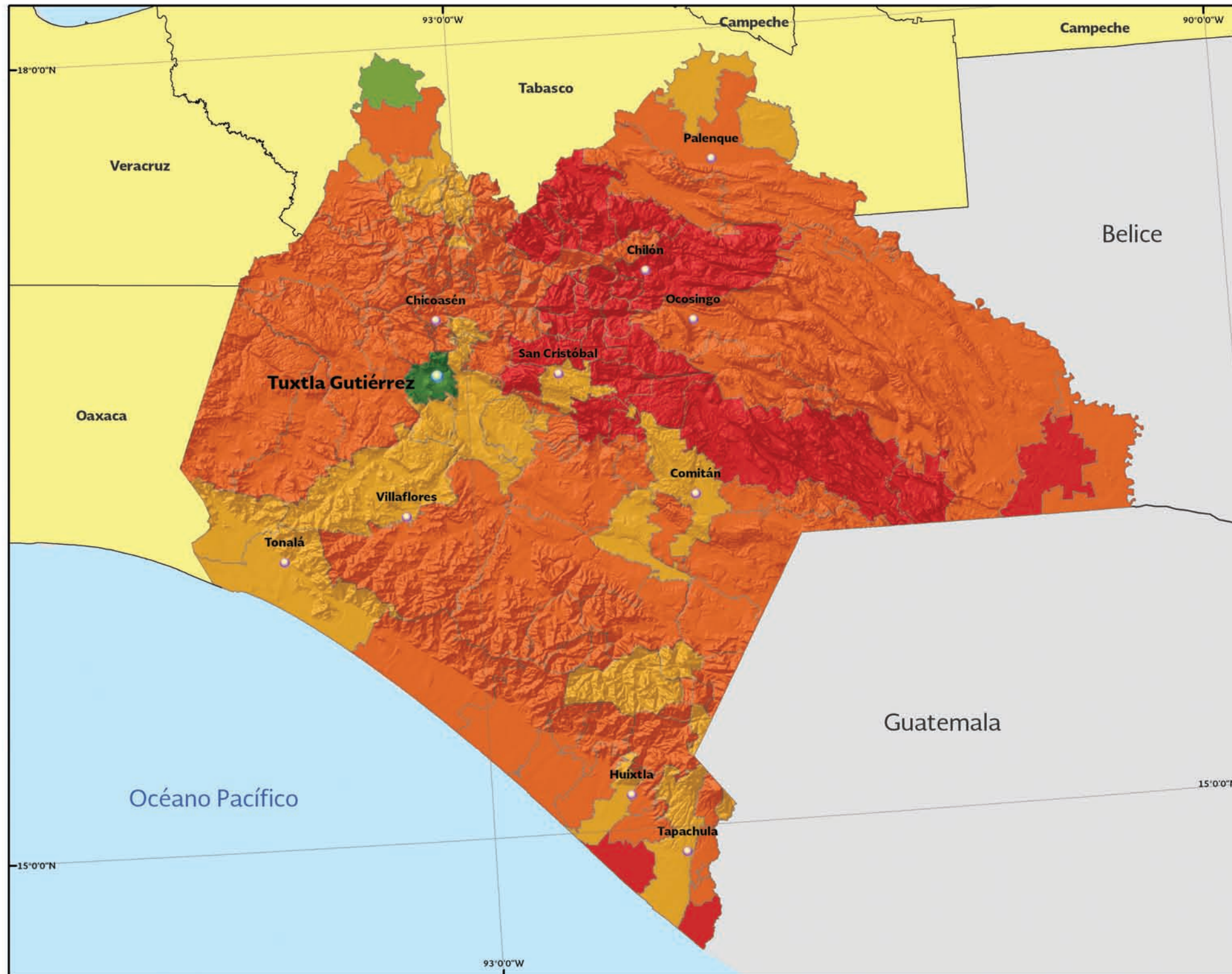
0 50 100




Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO: CHIAPAS

Mapa 1.20








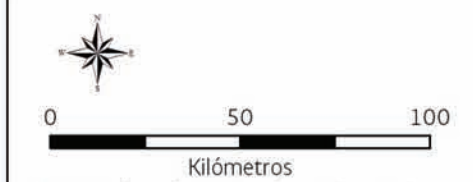
Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice de Vulnerabilidad Social

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo

Elaboración propia con datos de INEGI (2010), CONAPO (2010) e INEGI/Ssa (2010)

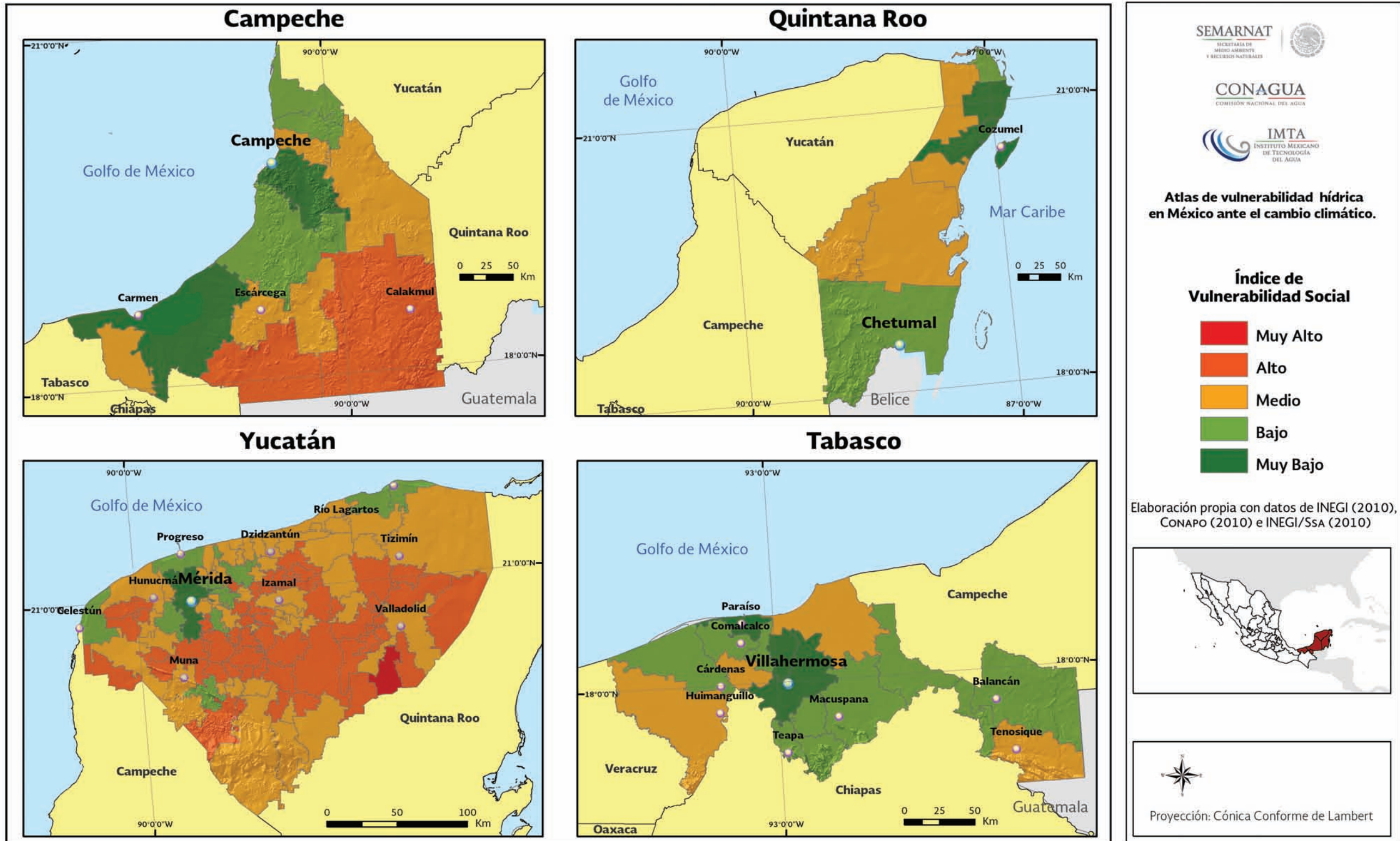




Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VULNERABILIDAD SOCIAL POR MUNICIPIO

Mapa 1.21



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El concepto “vulnerabilidad” es eminentemente social, toda vez que hace referencia a las características, habilidades y capacidades que impide a hombres y mujeres disminuir los riesgos de una amenaza, y transformar sus condiciones de vida hacia la construcción de una mayor capacidad de adaptación y resiliencia frente a los impactos del cambio climático.

La elaboración de un IVS de los municipios del país constituye una herramienta útil para conocer los estados en que se ubican las zonas más susceptibles de ser afectadas negativamente por los eventos meteorológicos extremos. Con este instrumento, las instancias gubernamentales correspondientes de los tres niveles de gobierno, la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Gobernación (SEGOB) a través de Protección Civil, entre otras, tienen la posibilidad de ubicar de manera rápida y precisa dónde están los municipios más vulnerables y, en consecuencia, diseñar e instrumentar programas y acciones que mejoren las condiciones de vida de esas comunidades; y, al mismo tiempo, generar las habilidades de los pobladores que les permitan estar mejor capacitados para prevenir, enfrentar y adaptarse a los eventos extremos.

Si bien los mapas de vulnerabilidad social son una herramienta útil para los tomadores de decisión, también deben serlo para los pobladores en lugares de zonas altamente vulnerables. Es por ello que la información obtenida debería hacerse llegar a las comunidades, localidades y municipios con mayor potencial de afectación por el cambio climático y desarrollar - o fortalecer, donde ya existan esfuerzos en este sentido - la participación social informada. Existen experiencias de sistemas comunitarios de alerta temprana contra inundaciones, las cuales podrían retomarse y adecuarse a los contextos específicos de las comunidades mexicanas.

Pese a que la construcción del IVS sea una herramienta de relevancia para la definición de políticas públicas y focalización de recursos, es perfectible. Uno de los aspectos fundamentales, en este sentido, sería la alimentación de datos más precisos sobre municipios y localidades no existentes en las fuentes estadísticas nacionales. En una versión más integral del nuevo IVS se necesita incorporar información sobre temas tales como: densidad de establecimientos y servicios médicos, tamaño de poblaciones con necesidades especiales (migrantes, jornaleros, etcétera), porcentaje de tenencia de vivienda, percepción local del riesgo, existencia de instituciones y planes de prevención y atención al riesgo, mecanismos de organización y participación comunitaria, entre otros. De esta manera, sería conveniente que INEGI ampliara sus bases de datos tomando en cuenta algunos de los referentes arriba mencionados.

REFERENCIAS

- Adger, Neil (2003), “Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change”, en *Economic Geography* 79(4): 387-404, Tyndall Centre for Climate Change Research and CSE, University of East Anglia, United Kingdom.
- Barriga Machicao, Milka Mabel (2004), *El rol del capital social en la reducción de vulnerabilidad y prevención de riesgos. Caso del municipio de Estelí-Nicaragua*, tesis de Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación, Escuela de Posgrado, Turrialba, Costa Rica.
- Blaikie, Piers, Terry Cannon, Ian Davis y Ben Wisner (1998), *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*, La RED, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Bogotá, en: <http://www.desenredando.org>, consulta: marzo 2010.

- Busso, Gustavo (2001), “Vulnerabilidad social: nociones e implicaciones de políticas para Latinoamérica a inicios del siglo XXI”, Seminario Internacional: *Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile, 20 y 21 de junio de 2001, CEPAL, Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (Celade)-División de Población.
- CONAPO (2011), *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010*, CONAPO, México.
- Cutter, Susan, Christopher Emrich, Jennifer Web and Daniel Morath (2009), *Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature*, Final Report to Oxfam America, Hazard and Vulnerability Research Institute, University of South Carolina.
- Dazé, Angie, Kaia Ambrose y Charles Ehrhart (2010), *Manual para el análisis de capacidad y vulnerabilidad climática*, CARE, Lima, Perú.
- Díaz, Marjorie (2010), *Análisis del proceso de gestión de riesgos a inundaciones en la cuenca alta del río Matagalpa, Nicaragua*, tesis de Magister Scientiae, Turrialba, CATIE, Costa Rica.
- Filgueira, Carlos (2001), “Estructura de oportunidades y vulnerabilidad social. Aproximaciones conceptuales recientes”, Seminario Internacional: *Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile, 20 y 21 de junio de 2001, CEPAL, Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (Celade)-División de Población.
- ____ (1998), *Welfare and Citizenship: New and Old Vulnerabilities*, en O’Donnell, Guillermo y Victor E. Tokman, *Poverty and Inequality in Latin America*, University of Notre Dame Press.
- García Arróliga, Norlang; Rafael Marín Cambranis y Karla Méndez Estrada (2006), *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: evaluación de la vulnerabilidad física y social*, CENAPRED, México.
- Gutiérrez, Isabel y Jaqueline Siles (2008), Diagnóstico de medios de vida y capitales de la comunidad de Humedales de Medio Queso. Los Chiles, Costa Rica, CATIE, UICN, San José de Costa Rica.
- INEGI (2011), *Censo de Población y Vivienda 2010*, INEGI, México.
- Instituto de Recursos Mundiales (2006), *Guía de recursos mundiales: la riqueza del pobre*, Instituto de Recursos Mundiales, PNUD, PNUMA, Banco Mundial.
- Kaztman, Ruben y Carlos Filgueira (1999), *Marco conceptual sobre activos, vulnerabilidad y estructura de oportunidades*, PNUD, CEPAL, Montevideo.
- Macías, Jesús Manuel (1992), “Significado de la vulnerabilidad social frente a los desastres”, *Revista Mexicana de Sociología* 54 (4), 3-10, Instituto de Investigaciones Sociales, UNAM, México.
- Moser, Caroline and David Satterthwaite (2008), *Towards Pro-poor Adaptation to Climate Change in the Urban Centres of Low- and Middle-income Countries*, Climate Change and Cities Discussion Paper 3, IIED, Washington, D.C.
- Pizarro, Roberto (2001), “La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina”, *Estudios Estadísticos y Prospectivos*, Serie 6, CEPAL, ECLAC, Naciones Unidas, División de Estadística y Proyecciones Económicas, Santiago de Chile.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2008), *Guía recursos de género para el cambio climático*, PNUD, México.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2007), *Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: solidaridad frente a un mundo dividido*, PNUD, México.
- Secretaría de Salud (2010), *Sistema Nacional de Información en Salud*, SSa, México.
- SIISE (2003), *Índice de Vulnerabilidad Social (IVS). ¿Qué es?*, SIISE, en: <http://www.unesu.org/far.AEE05/Lectura.vulnerabilidad1.pdf>, consulta: julio de 2010.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Luis Martínez por su aportación fotográfica.





CAPÍTULO 2

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO

José Antonio Salinas Prieto, Gabriela Colorado Ruiz y María Eugenia Maya Magaña





RESUMEN

Uno de los proyectos asociados a la Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue la actualización de escenarios de cambio climático para México, realizado mediante una colaboración conjunta entre el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quienes estuvieron coordinados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Se presenta un análisis regional de la precipitación, temperatura máxima y mínima para el periodo histórico 1971-2000 y dos periodos futuros: 2015-2039 y 2075-2099 utilizando las proyecciones de 14 Modelos de Circulación General (MCG) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), bajo los nuevos escenarios de cambio climático RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5. Dado que los modelos individualmente reproducen parcialmente las variables analizadas, se aplicó el método de Fiabilidad del Ensamble Ponderado (REA, por sus siglas en inglés) que asigna pesos a cada modelo según su desempeño, lo cual minimiza sus errores. El REA se aplicó a las simulaciones de 14 MCG en los tres periodos de tiempo.

Para evaluar el desempeño de los modelos se estimó el error medio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés) del promedio simple y el promedio REA de estos respecto a las observaciones de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación provenientes de la base de datos mensuales de la Unidad de Investigación del Clima (CRU, por sus siglas en inglés) de la Universidad de East Anglia. La ventana espacial analizada fue de 0 a 35N y de 70W a 130W. Las simulaciones de los MCG se interpolaron bilinealmente a la malla de la base de datos CRU (de 50 km de resolución).

INTRODUCCIÓN

La atmósfera, los océanos y los continentes pertenecen al llamado sistema climático terrestre, el cual mantiene una compleja dinámica entre sus componentes y es investigada de manera interdisciplinaria en campos como la meteorología, oceanografía e hidrología, entre otras. Así, es importante comprender la relación océano-atmósfera y atmósfera-continentes para interpretar sus consecuencias, tanto en el tiempo meteorológico como en el clima y sus efectos en las actividades humanas. Este sistema climático terrestre recibe energía solar como forzante primario, la interacción de la atmósfera con los océanos, continentes y hielos polares genera las condiciones climáticas que conocemos, producto de procesos dinámicos (movimientos de masas atmosféricas y oceánicas) y energéticos, como reflexión, absorción y emisión dentro en la atmósfera y el océano.

El efecto invernadero en la atmósfera ha permitido adquirir las condiciones propicias para la vida en el planeta desde su formación. Sin la presencia de los gases de invernadero como el vapor de agua y el bióxido de carbono (CO_2), la temperatura media de la superficie terrestre sería significativamente menor y, por ende, no existirían las condiciones de vida actuales. Una parte de la radiación entrante es absorbida por la atmósfera y sus nubes, otra por la superficie terrestre, dependiendo tanto de la latitud como de la nubosidad y las estaciones del año. Desde el punto de vista de energía, se espera que exista un balance entre la energía entrante al planeta y la saliente; sin embargo, este balance se modifica cuando los gases de efecto de invernadero en la atmósfera se incrementan (vapor de agua y CO_2 , principalmente).

Un tema de interés mundial es que si a partir de la revolución industrial, la humanidad ha emitido cantidades de CO_2 a la atmósfera sin precedente, ¿cuál será el efecto de éstas en el clima? Sin embargo, dada la naturaleza del problema, no es fácil cuantificar los efectos en el clima global atribuibles a esta fuente de CO_2 asociada a efectos antropogénicos.

El estudio de la variabilidad y el cambio climático requiere contar con información científica a nivel regional con el objetivo de identificar, diseñar y llevar a cabo acciones de mitigación y adaptación ante los posibles impactos de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Una de las herramientas fundamentales para tal fin son los escenarios de cambio climático, que nos permiten proyectar las condiciones potenciales del clima futuro bajo ciertos escenarios de emisiones de gases de efecto de invernadero.

Una fuente de información para la toma de decisiones son los estudios basados en las simulaciones de la dinámica atmosférica bajo escenarios de cambio climático, analizando sus variaciones, tendencias, impactos y el desempeño de los modelos. En ese sentido, es imprescindible fomentar las capacidades técnicas nacionales en cuanto al manejo de información para la generación de escenarios; su correcta interpretación y aplicación es importante para conocer, tanto la vulnerabilidad actual como la futura, generando planes estratégicos sustentados. Contar con información actualizada de las proyecciones del posible clima futuro es fundamental para identificar y analizar la vulnerabilidad de la población, del ecosistema y de la infraestructura, y con ello, generar la adaptación al clima actual y a su cambio, emprendiendo acciones encaminadas a disminuir esta vulnerabilidad.

Para responder a las interrogantes científicas derivadas del Cuarto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2007), se generó el proyecto científico llamado CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 5, por sus siglas en inglés) bajo el patrocinio del programa de investigación del clima mundial (WCRP, por sus siglas en inglés). Sus resultados fueron producidos por centros internacionales de modelación del clima y coordinado por el CMIP5. Este proyecto realizó un conjunto de experimentos numéricos para estudiar la predictibilidad del clima, explorando los alcances y limitaciones de los modelos para reproducirlo a escalas decenales.



DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS RADIATIVOS RCP

La radiación solar entrante que afecta la dinámica atmosférica es absorbida por la Tierra, su atmósfera y sus océanos, mientras que una fracción de la radiación saliente es reflejada hacia el espacio. El balance entre la energía radiativa absorbida y la reflejada determina el promedio de temperatura. El balance radiativo (entre lo entrante y lo saliente) es alterado por la intensidad de la energía solar, la reflectividad de las nubes o gases y la absorción de varios gases de invernadero. Cualquiera de este tipo de alteración es un forzamiento radiativo y tiende a buscar un nuevo balance.

Los nuevos escenarios son trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) basados en el desbalance energético (entre la radiación entrante y la saliente) y se refieren al posible aumento global de energía radiativa en W/m^2 ; por ejemplo, RCP8.5 es el escenario más extremo que supone un aumento de $8.5 W/m^2$ para el año 2100 debido al aumento de gases de efecto de invernadero (Moss *et al.*, 2010). Estos escenarios RCP son considerados en el Quinto Reporte de Evaluación del IPCC (AR5, por sus siglas en inglés). A pesar de que los nuevos escenarios RCP consideran entre otros aspectos la concentración de CO_2 en la atmósfera y su distribución temporal en el futuro, no hay una equivalencia entre ambos.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO REA

El método REA propuesto y desarrollado por Giorgi y Mearns (2001), implementado por primera vez para México por Montero y Pérez (2008) y Montero *et al.* (2010), se aplicó para integrar la información de los 14 MCG analizados para tres escenarios de radiación: RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, para las variables precipitación, temperatura mínima y máxima. Como parte de la evaluación del desempeño de los modelos, el método REA requiere datos observados, para lo cual se utilizó la base de la Unidad de Investigación Climática (CRU) versión TS 3.10. Este método de ensamble ponderado da mayor peso a los MCG que contengan los errores y sesgos más pequeños en comparación con las observaciones y la dispersión futura de los modelos.

La fiabilidad de cada modelo se estima con base en dos criterios: i) Criterio de tendencia: es la similitud de un modelo respecto a los datos observados en el periodo histórico 1971-2000 (las menores diferencias obtendrán mayor confiabilidad) y ii) Criterio de convergencia: es la diferencia del modelo analizado respecto al ensamble de los MCG, es decir, al ensamble ponderado REA. La incertidumbre se estima calculando la raíz del error cuadrático medio del REA.

Por simplicidad en el análisis, para los modelos numéricos es recomendable utilizar porcentajes de cambio, el cual es calculado utilizando datos históricos (REA histórico) y el de cada escenario futuro (REA futuro). En el caso de la precipitación, se calculó con la diferencia de los porcentajes de contribución históricos y futuros de cada mes al acumulado anual del periodo histórico 1971-2000. Es decir, se considera que el acumulado anual de precipitación es el 100%, y tanto para el periodo histórico como en el futuro, se calculó qué porcentaje contribuía cada mes al acumulado anual (ecuación 2.1), de tal modo que si se suman los porcentajes de cada mes debe de ser 100%.

$$\% CM = \frac{AA_h}{AM} * 100 \quad 2.1$$

Donde %CM, es el porcentaje de la contribución mensual, AA_h es el valor acumulado anual histórico y AM es el valor acumulado mensual en milímetros. Para calcular el porcentaje de cambio, se aplica la ecuación 1 para el ciclo anual tanto del ensamble histórico como de cada proyección futura (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5); una vez que se tiene el porcentaje de contribución de cada mes, se estima la diferencia entre el porcentaje de contribución futura y la histórica (ecuación 2.2).

$$\% \Delta P = \% CM_{futura} - \% CM_{histórica} \quad 2.2$$

DATOS

Se utilizaron dos fuentes de información:

- Observaciones (CRU), periodo 1971-2000. Variables: precipitación y temperatura mínima y máxima, con resolución temporal mensual y espacial de 0.5 grados.
- Ensamble simple de simulaciones de los modelos del experimento CMIP5 (cuadro 1) forzados por los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, que se refieren al posible aumento global de energía radiativa expresado en W/m^2 . Los periodos analizados son: 1971-2000, 2015-2039 y 2075-2099.
- El ensamble ponderado REA de los 14 MCG de la cuadro 1 para el periodo histórico y los dos periodo futuros (Cavazos *et al.*, 2013).

RESULTADOS

La distribución espacial de la precipitación observada en México para el periodo primavera-verano de 1971-2000, refleja la influencia orográfica (Mapa 2.1), con valores máximos en el sureste, extremos en Chiapas y norte de Oaxaca, e intermedios en la vertiente del Golfo de México y costa sur del Pacífico. En el noroeste se observa la influencia del llamado Monzón de Norteamérica, con precipitaciones en Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Durango. Los valores mínimos en Baja California se explican dado que las lluvias en esta región son de invierno. Por otra parte, el norte del país se caracteriza por ser una zona árida (este de Chihuahua, Coahuila, este de Nuevo León, norte de Zacatecas y San Luis Potosí). Estas precipitaciones están asociadas a eventos atmosféricos generados en los trópicos, como sistemas convectivos de mesoescala, ondas del este y huracanes, principalmente.

Para el periodo otoño-invierno, los procesos atmosféricos dominantes son de origen extra tropical, como los frentes fríos; no obstante, de septiembre a noviembre aún afectan procesos de origen tropical. Se mantiene la distribución espacial de la precipitación de este periodo, sin embargo, los valores extremos se

Cuadro 2.1. Modelos de circulación global utilizados.

Modelos de Circulación General (MCG)		
1. Max-Planck Institute (MPI-ESM-LR)	6. Beijing Climate Center (BCC-CSM1-1)	12. Met Office Hadley (MOHC)
2. Institute for Numerical Mathematics (INM)	7. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-cm5a-lr)	13. Meteorological Research Institute (MRI-CGCM3)
3. Norwegian Climate Center (NorESM1)	8. NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS-E2-R)	14. Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO-MK3-6)
4. Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CanESM2)	9 y 10. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC-esm-chem y MIROC-esm)	
5. Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM-CM5)	11. Atmosphere and Ocean Research Institute (MIROC5)	

observan en Tabasco y Chiapas, disminuyendo los valores en costas del Pacífico desde Jalisco hasta Chiapas.

La temperatura máxima observada en primavera-verano muestra el efecto costero y orográfico, en la frontera norte y mayoría de las zonas costeras a excepción de Baja California; ésta oscila entre 34 y $36^\circ C$ en el sur Sinaloa y Nayarit (mapa 2.2), en las zonas centrales y en Baja California Sur varía entre $26^\circ C$ y $30^\circ C$.

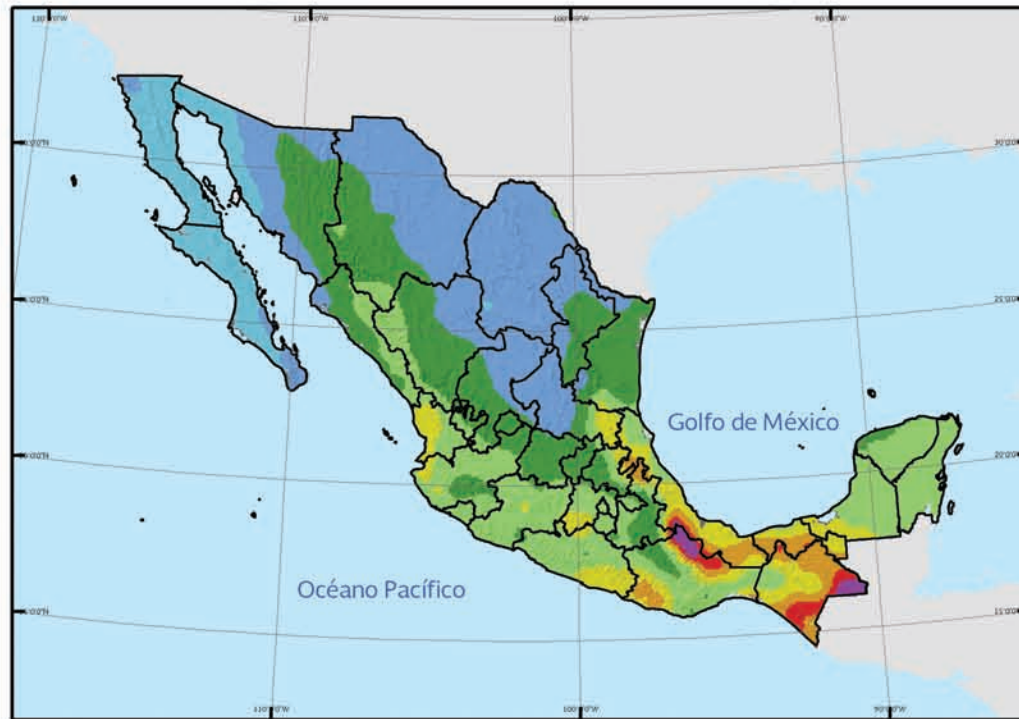
Para otoño-invierno, en ambos litorales, la temperatura máxima se observa entre $28^\circ C$ y $30^\circ C$; ello a excepción del norte de Baja California, con valores de $24^\circ C$. En estados sin colindancia con litorales se observan valores entre 22 y $26^\circ C$.

En la distribución de temperatura mínima observada durante primavera-verano se destaca que los valores mayores a $21^\circ C$ se registraron en la vertiente del Golfo de México, estado de Guerrero y costas del Caribe, así como el sureste y Península de Yucatán (mapa 2.3), en el norte de costas del Pacífico y sur de Baja California se registraron valores entre $19^\circ C$ y $21^\circ C$. En el norte de Baja California se observan los menores valores en costas ($11^\circ C$).

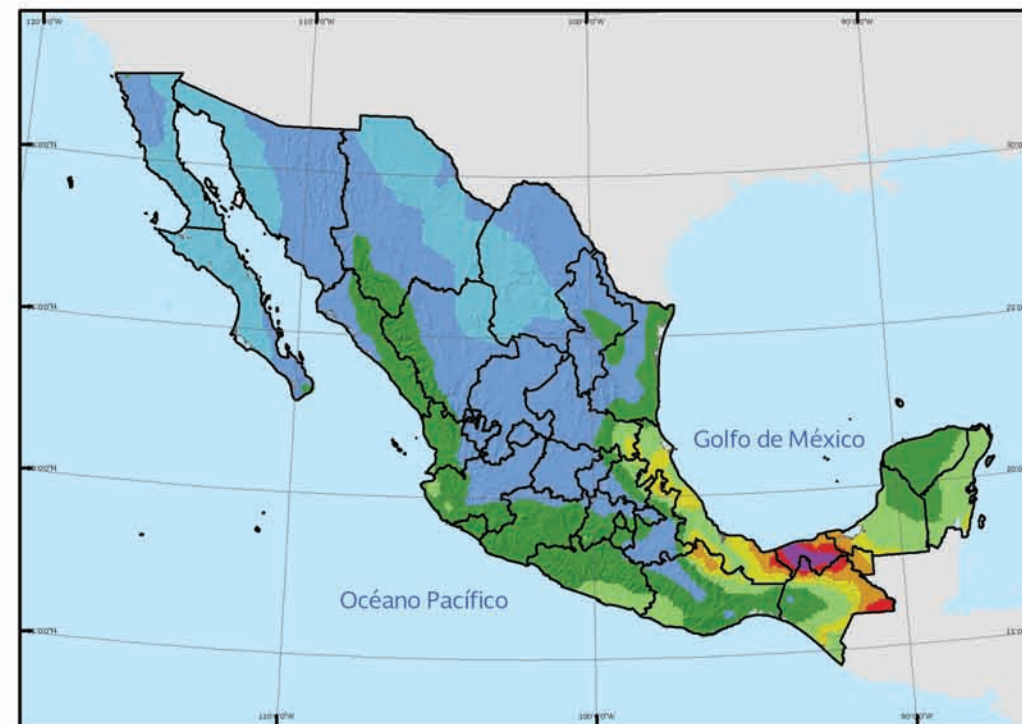
Durante otoño-invierno, en la porción norte de la vertiente del Pacífico y del Golfo de México la temperatura mínima tiene valores entre $13^\circ C$ y $15^\circ C$, así como en Baja California Sur, mientras que desde las costas del sur de Veracruz hasta Yucatán

PRECIPITACIÓN ACUMULADA 1971-2000

Mapa 2.1



Primavera - Verano



Otoño - Invierno



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Precipitación [mm]

- > 1500
- 1250 a 1500
- 1000 a 1250
- 750 a 1000
- 500 a 750
- 250 a 500
- 100 a 250
- 0 a 100

Entidad federativa

Datos CRU
Período: 1971-2000



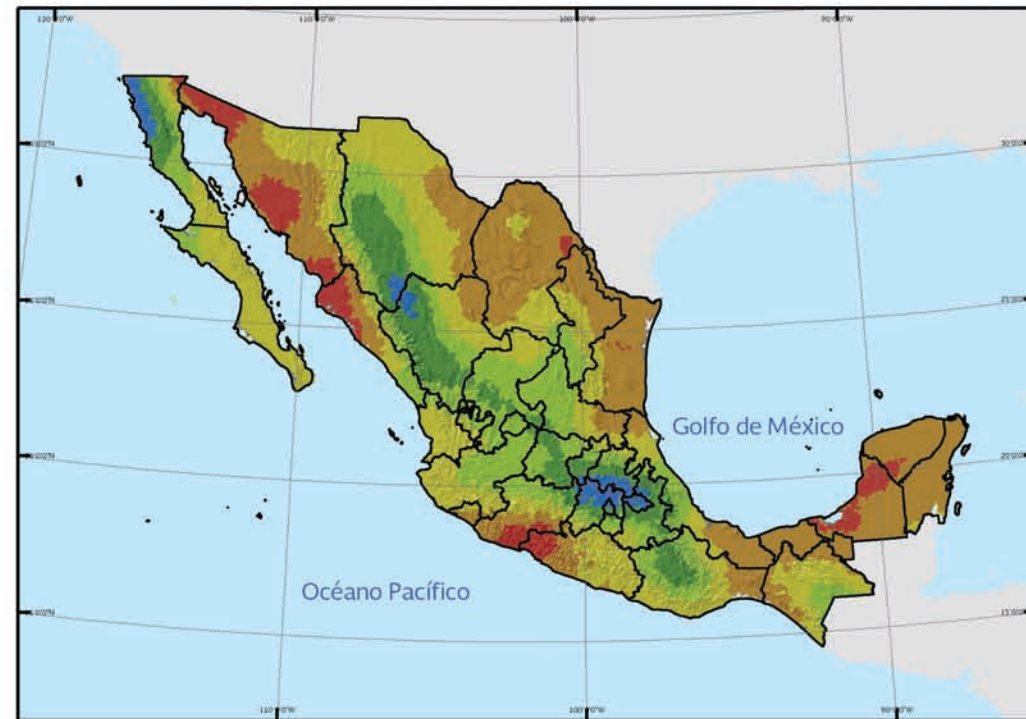
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

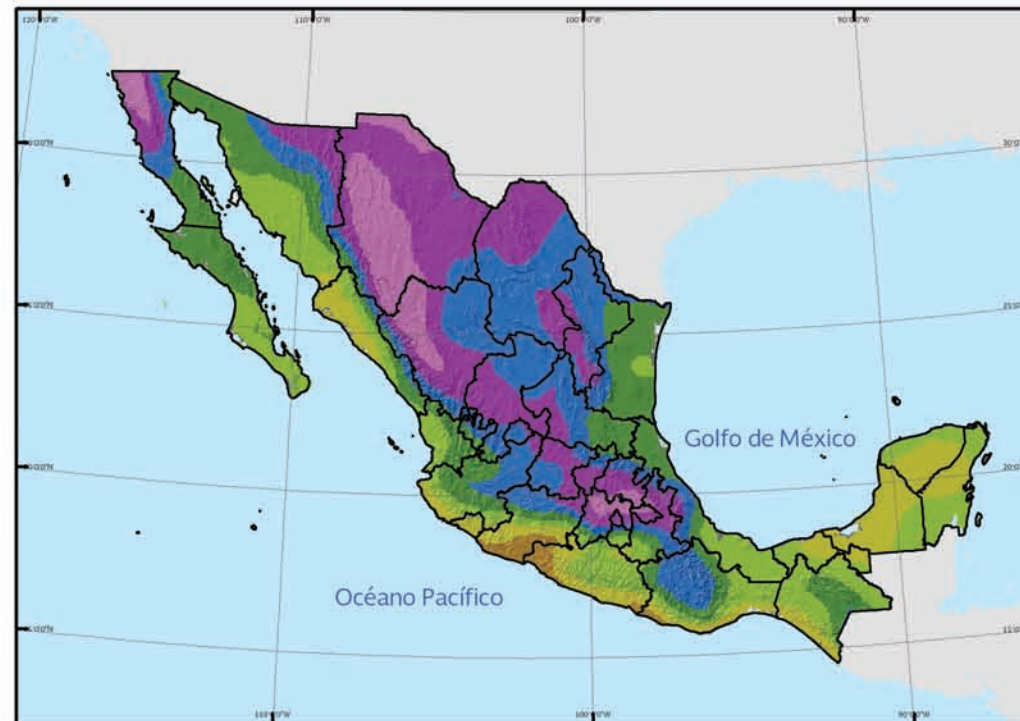
TEMPERATURA MÁXIMA 1971-2000

Mapa 2.2



Primavera - Verano

Otoño - Invierno



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Temperatura máxima [°C]

- 36
- 34
- 32
- 30
- 28
- 26
- 24
- 22

Entidad federativa

Datos CRU
Periodo: 1971-2000



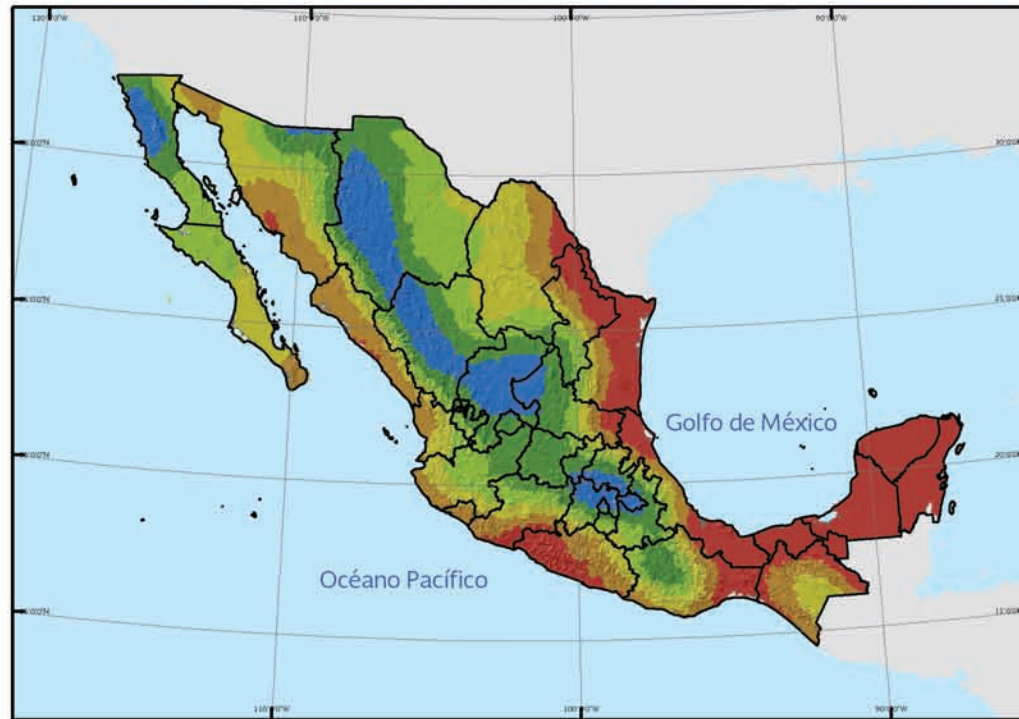
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

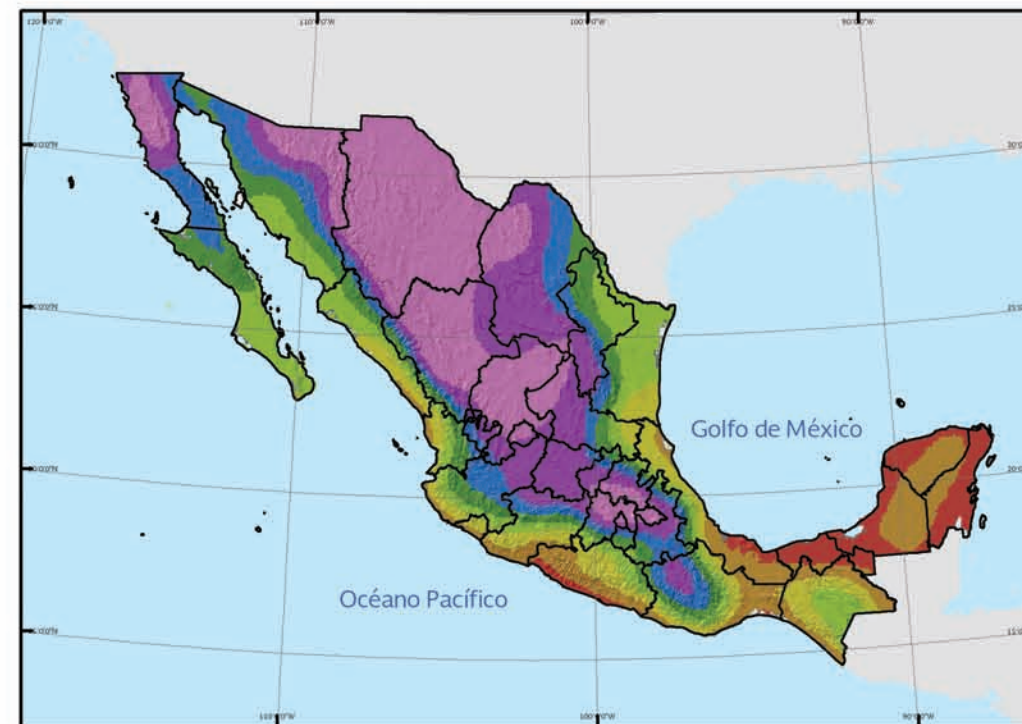
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

TEMPERATURA MÍNIMA 1971-2000

Mapa 2.3



Primavera - Verano



Otoño - Invierno



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Temperatura mínima [°C]

- 21
- 19
- 17
- 15
- 13
- 11
- 09
- 07

Entidad federativa

Datos CRU
Período: 1971-2000



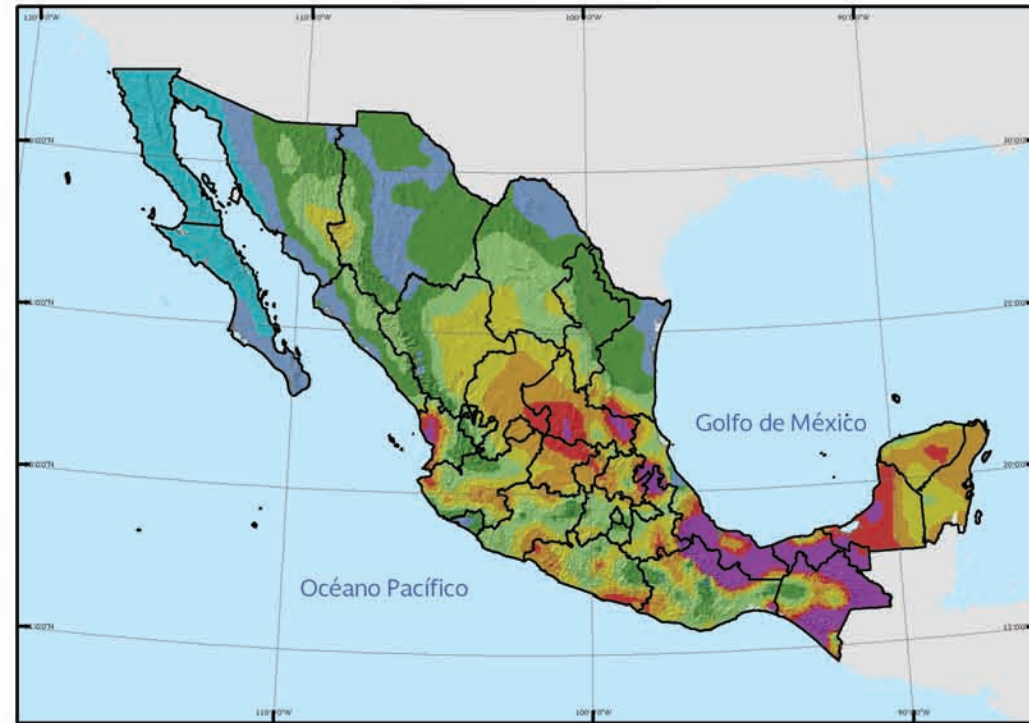
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

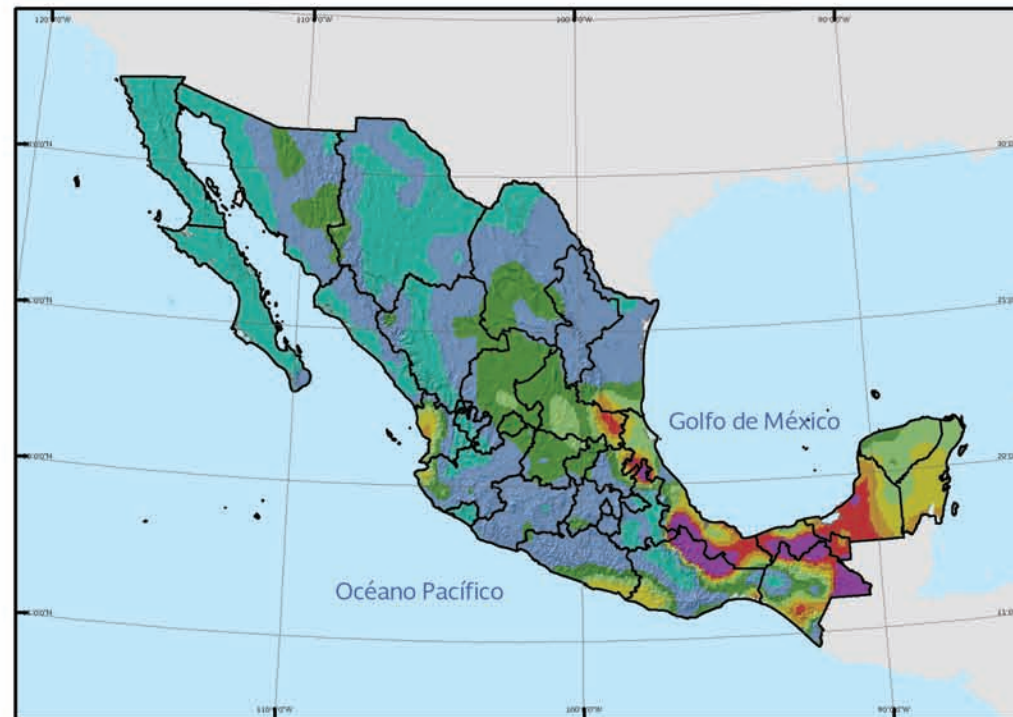
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ERROR MEDIO ABSOLUTO: PRECIPITACIÓN PRIMAVERA-VERANO

Mapa 2.4



Ensamble simple
de 14 MCG



Ensamble ponderado
de 14 MCG (REA)



Atlas de vulnerabilidad hídrica
en México ante el cambio climático.

**Precipitación
[mm]**

- > 70
- 60 a 70
- 50 a 60
- 40 a 50
- 30 a 40
- 20 a 30
- 10 a 20
- 0 a 10

Entidad federativa

Error medio absoluto del ensamble
simple y ponderado (REA, ver texto)
Periodo: 1971-2000



0 225 450 900 1,350

Kilómetros

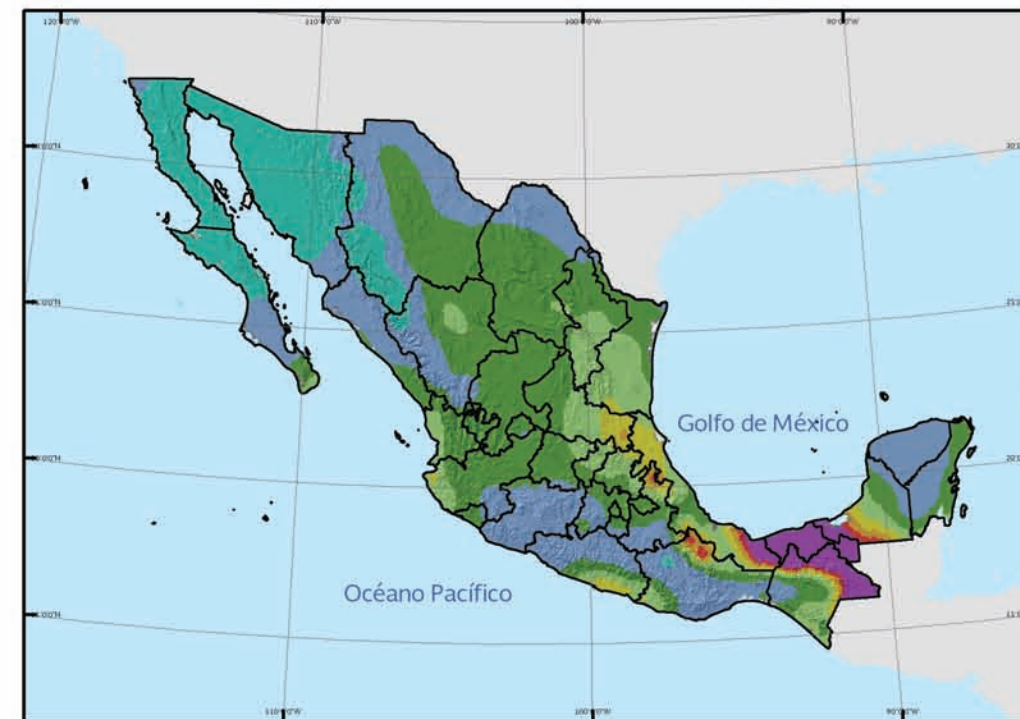
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ERROR MEDIO ABSOLUTO: PRECIPITACIÓN OTOÑO-INVIERNO

Mapa 2.5



Ensamble simple de 14 MCG



Ensamble ponderado de 14 MCG (REA)



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Precipitación [mm]

- > 70
- 60 a 70
- 50 a 60
- 40 a 50
- 30 a 40
- 20 a 30
- 10 a 20
- 0 a 10

Entidad federativa

Error medio absoluto del ensamble simple y ponderado (REA, ver texto) Período: 1971-2000.



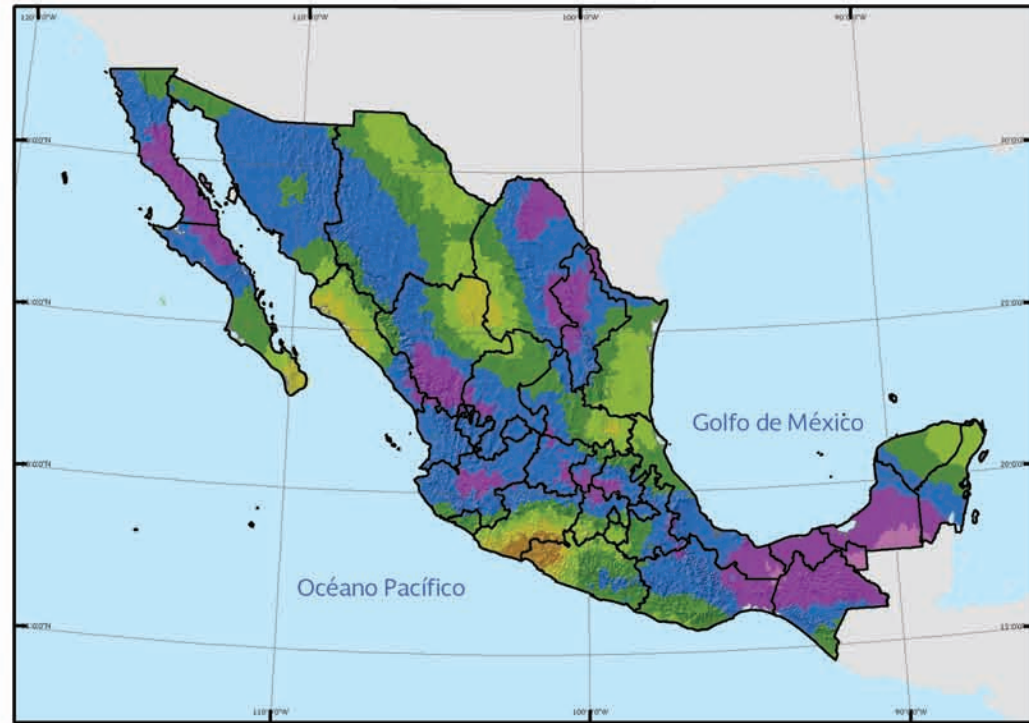
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ERROR MEDIO ABSOLUTO: TEMPERATURA MÁXIMA PRIMAVERA-VERANO

Mapa 2.6



Ensamble simple de 14 MCG

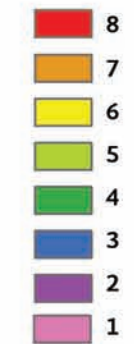


Ensamble ponderado de 14 MCG (REA)



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Temperatura máxima [°C]



Entidad federativa

Error medio absoluto del ensamble simple y ponderado (REA, ver texto) Período: 1971-2000



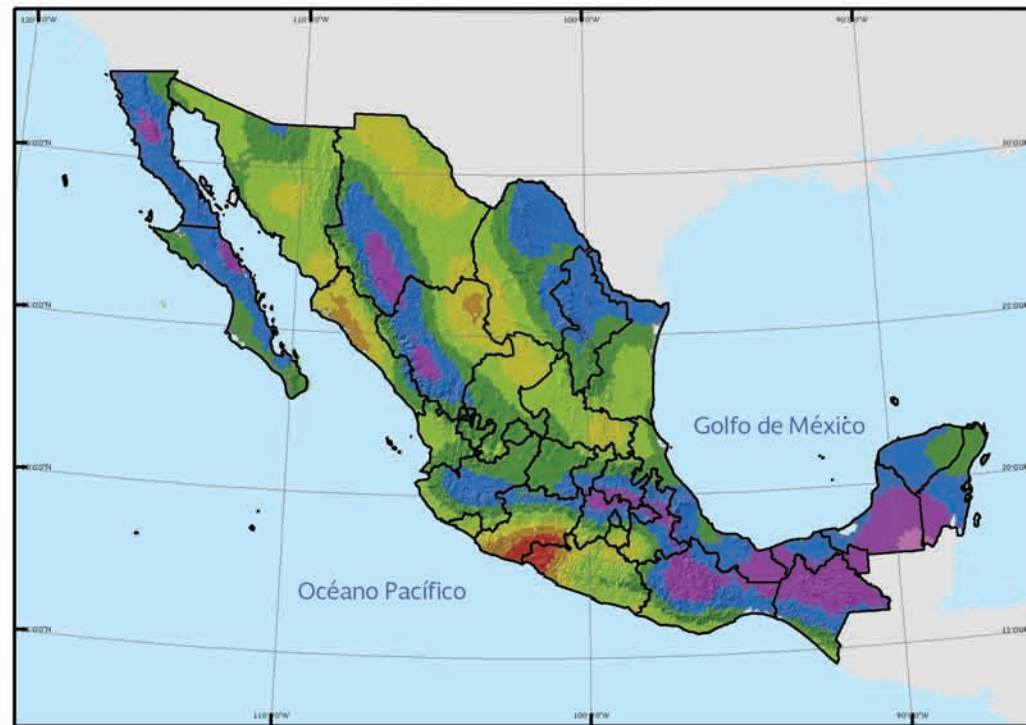
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ERROR MEDIO ABSOLUTO: TEMPERATURA MÁXIMA OTOÑO-INVIERNO

Mapa 2.7



Ensamble simple de 14 MCG

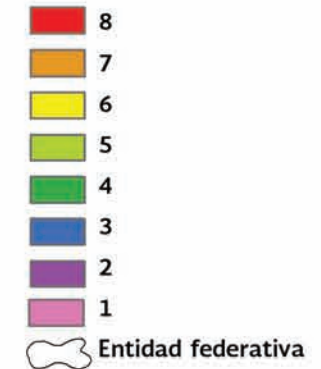


Ensamble ponderado de 14 MCG (REA)



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Temperatura máxima [°C]



Error medio absoluto del ensamble simple y ponderado (REA, ver texto) Periodo: 1971-2000



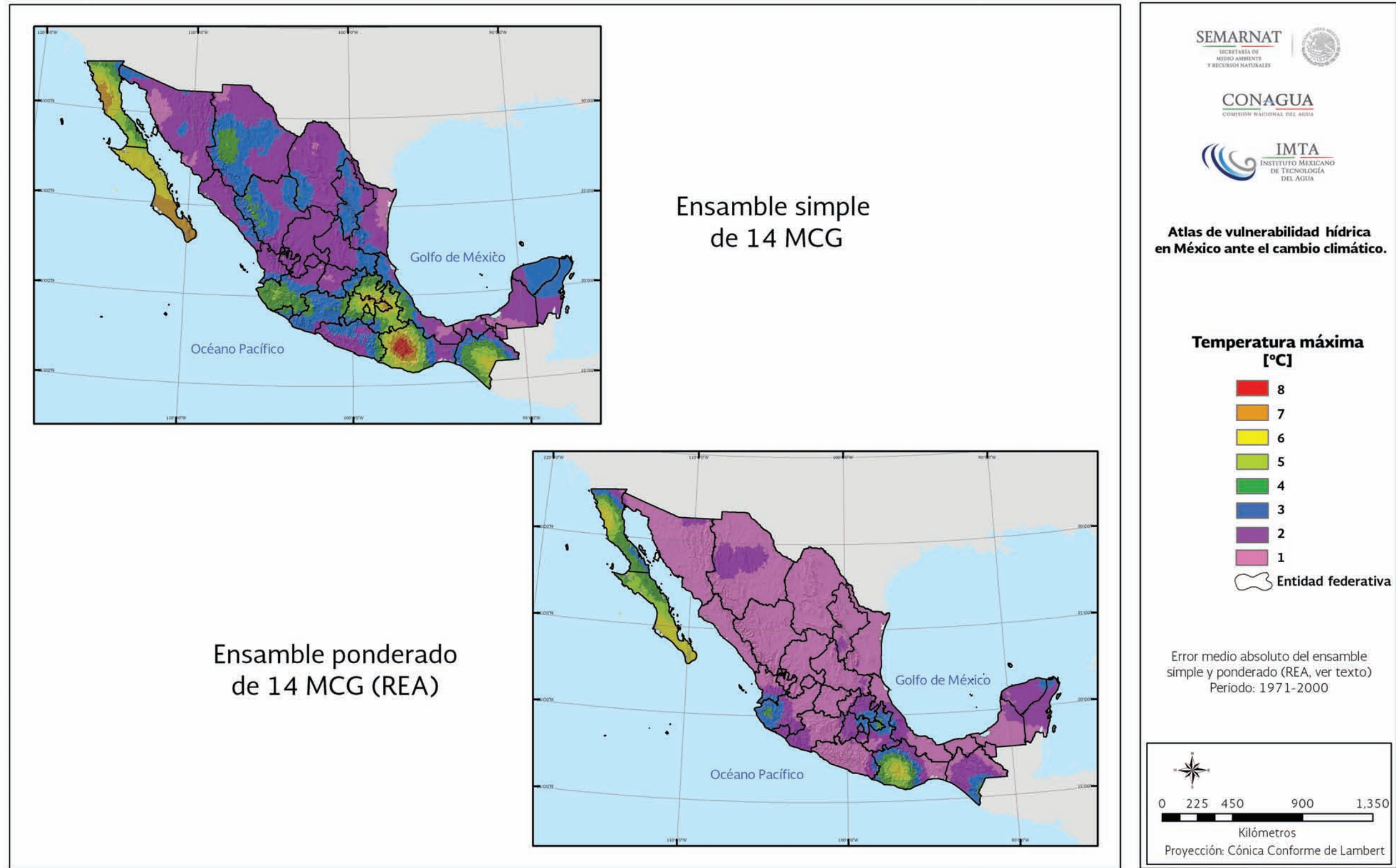
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

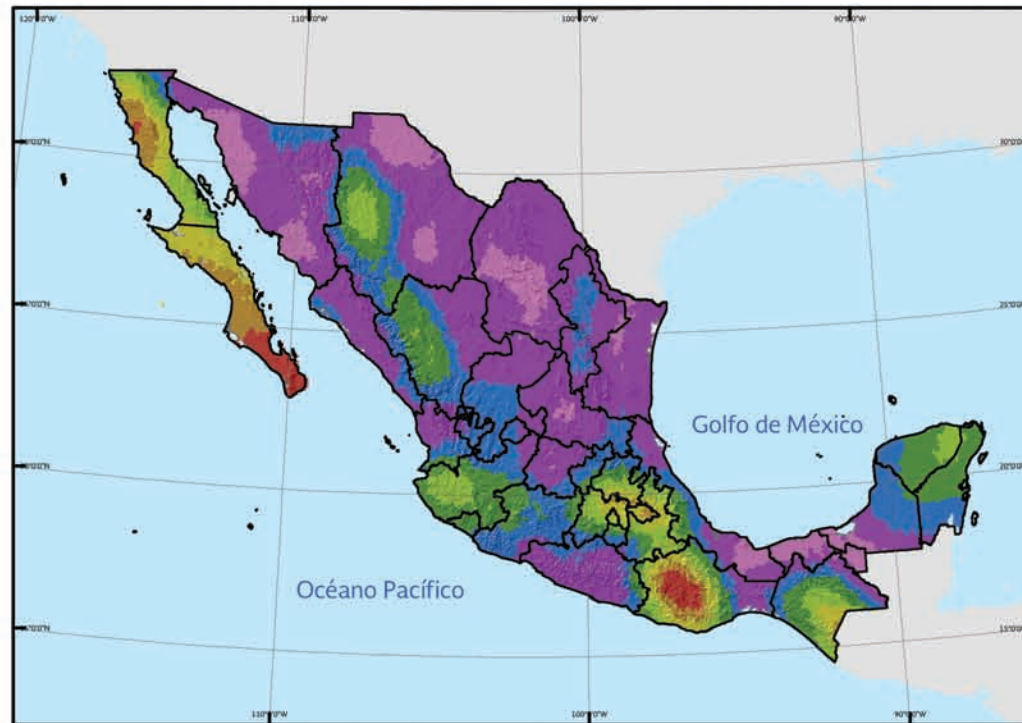
ERROR MEDIO ABSOLUTO: TEMPERATURA MÍNIMA PRIMAVERA-VERANO

Mapa 2.8

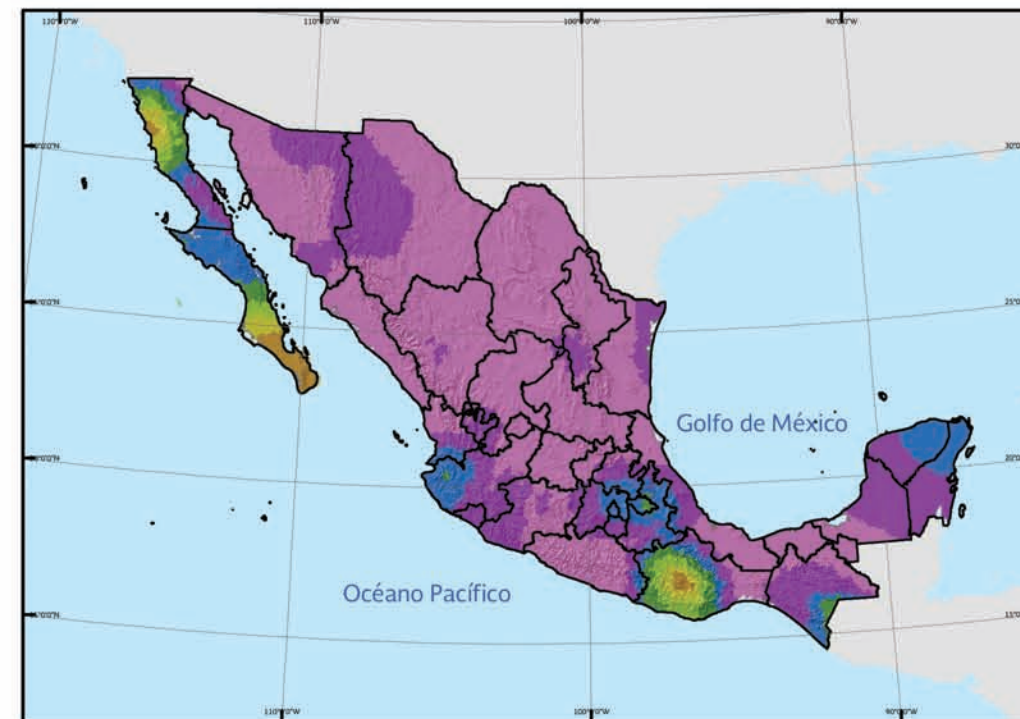


ERROR MEDIO ABSOLUTO: TEMPERATURA MÍNIMA OTOÑO-INVIERNO

Mapa 2.9



Ensamble simple de 14 MCG

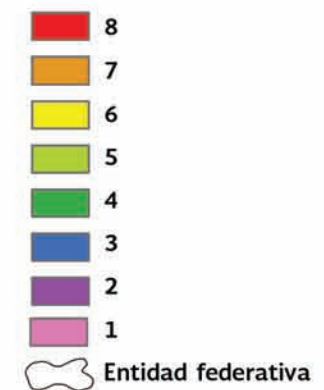


Ensamble ponderado de 14 MCG (REA)



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Temperatura máxima [°C]



Error medio absoluto del ensamble simple y ponderado (REA, ver texto) Período: 1971-2000



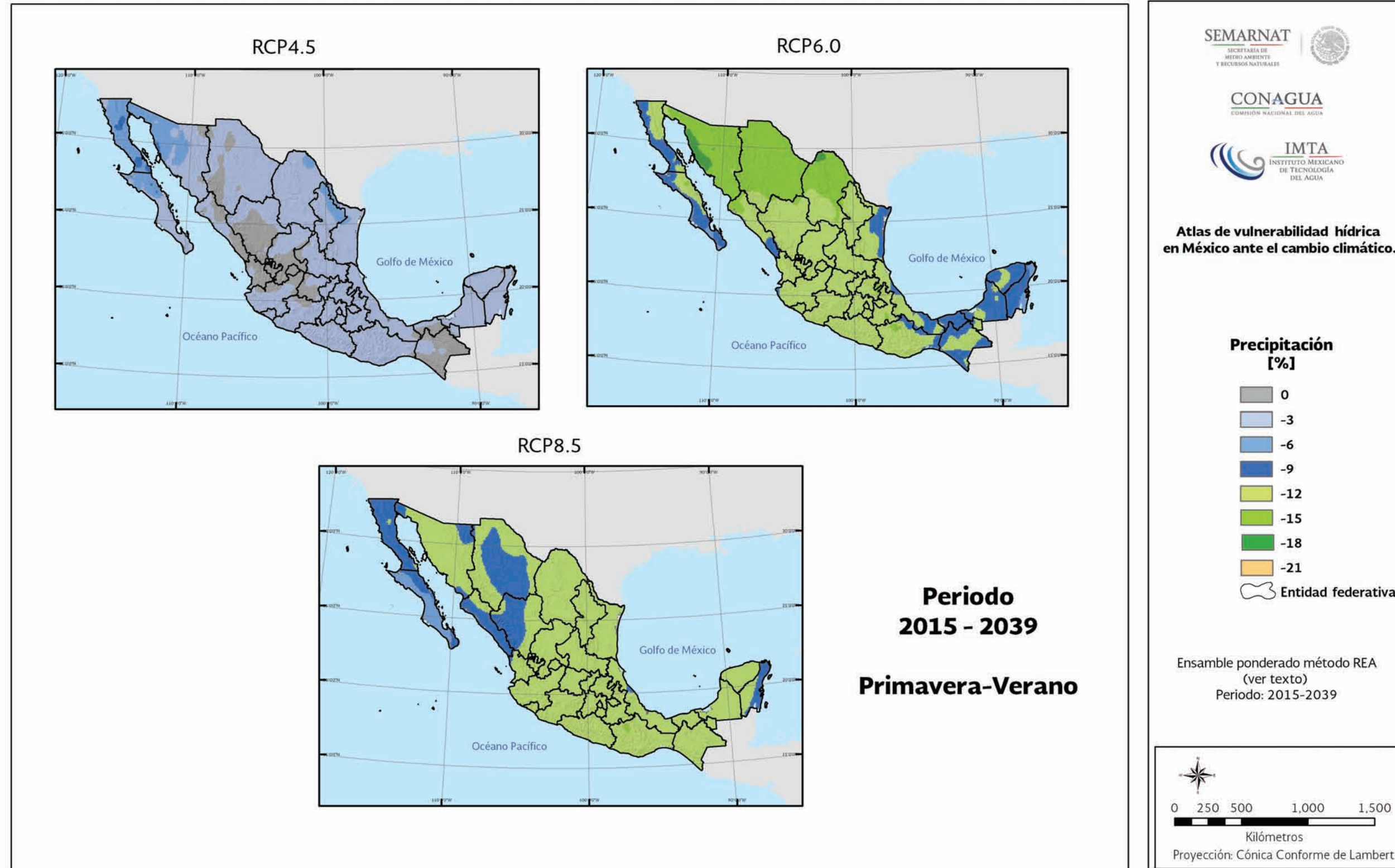
0 225 450 900 1,350

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

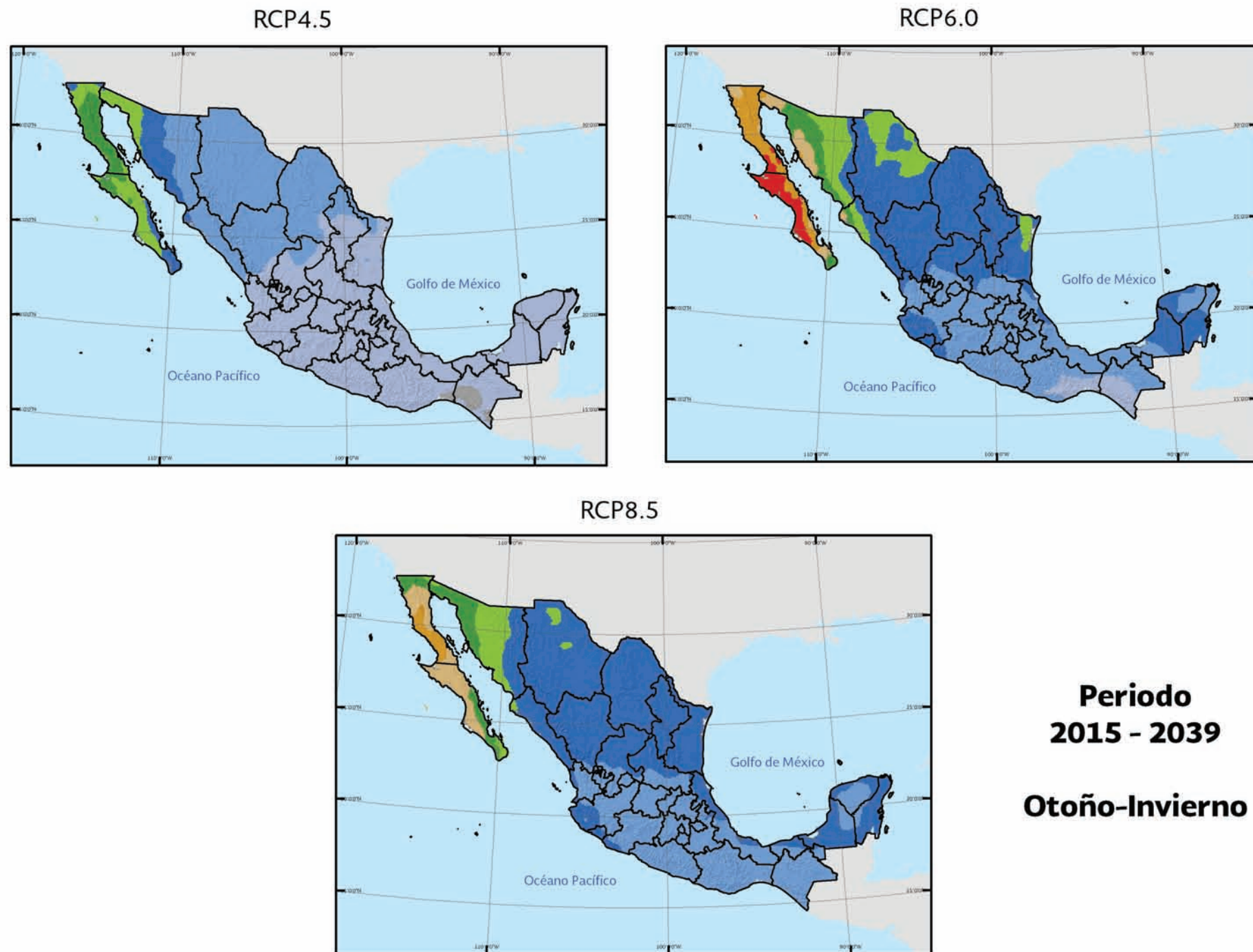
PROYECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN

Mapa 2.10



PROYECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN

Mapa 2.11

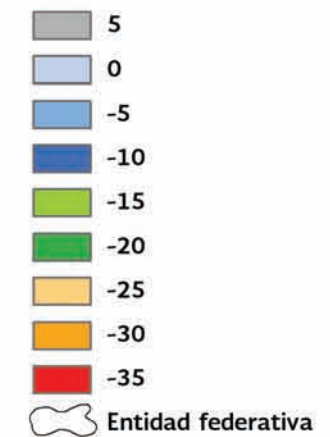


Periodo
2015 - 2039
Otoño-Invierno



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Precipitación [%]



Ensamble ponderado método REA
(ver texto)
Periodo: 2015-2039



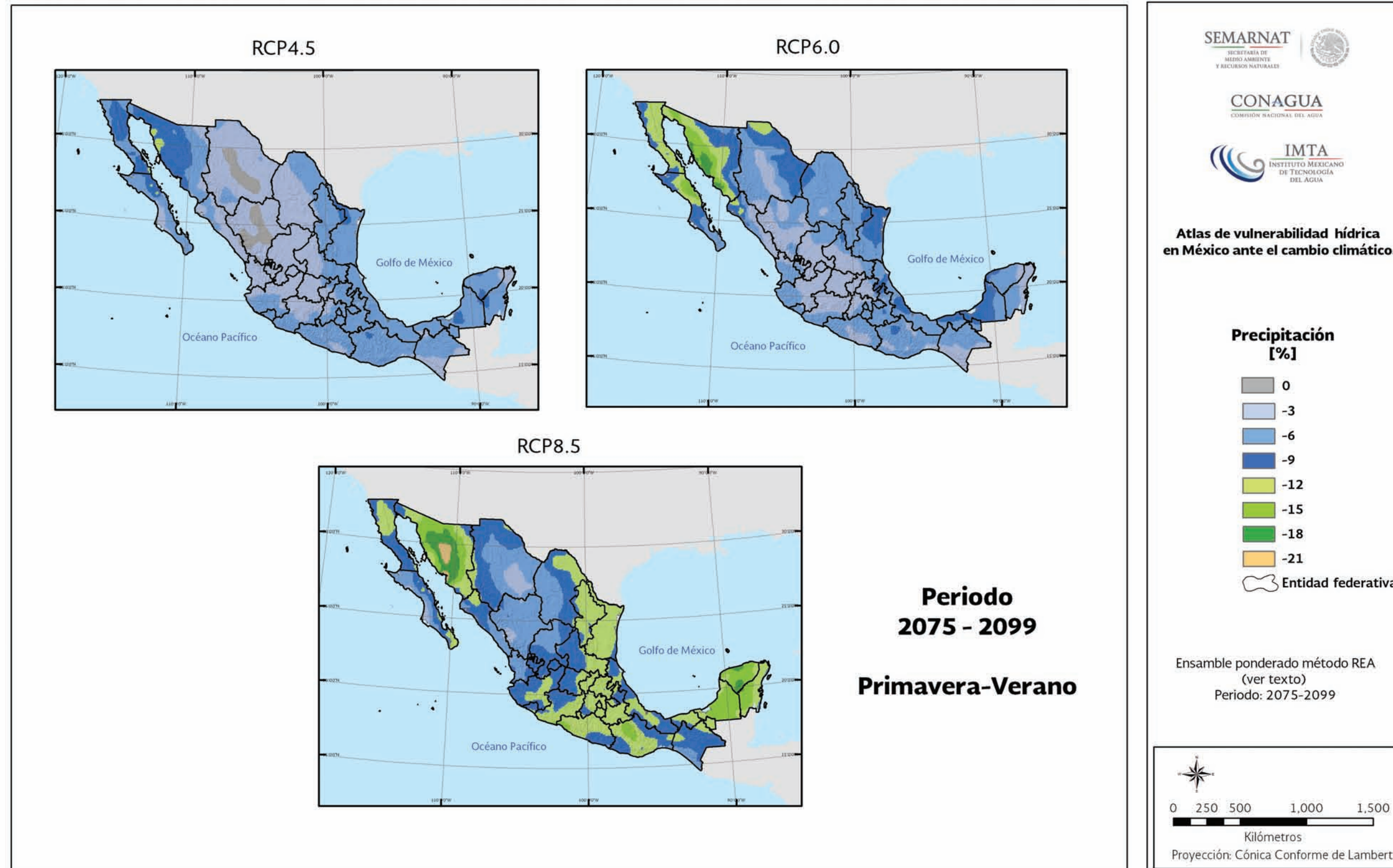
0 250 500 1,000 1,500

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

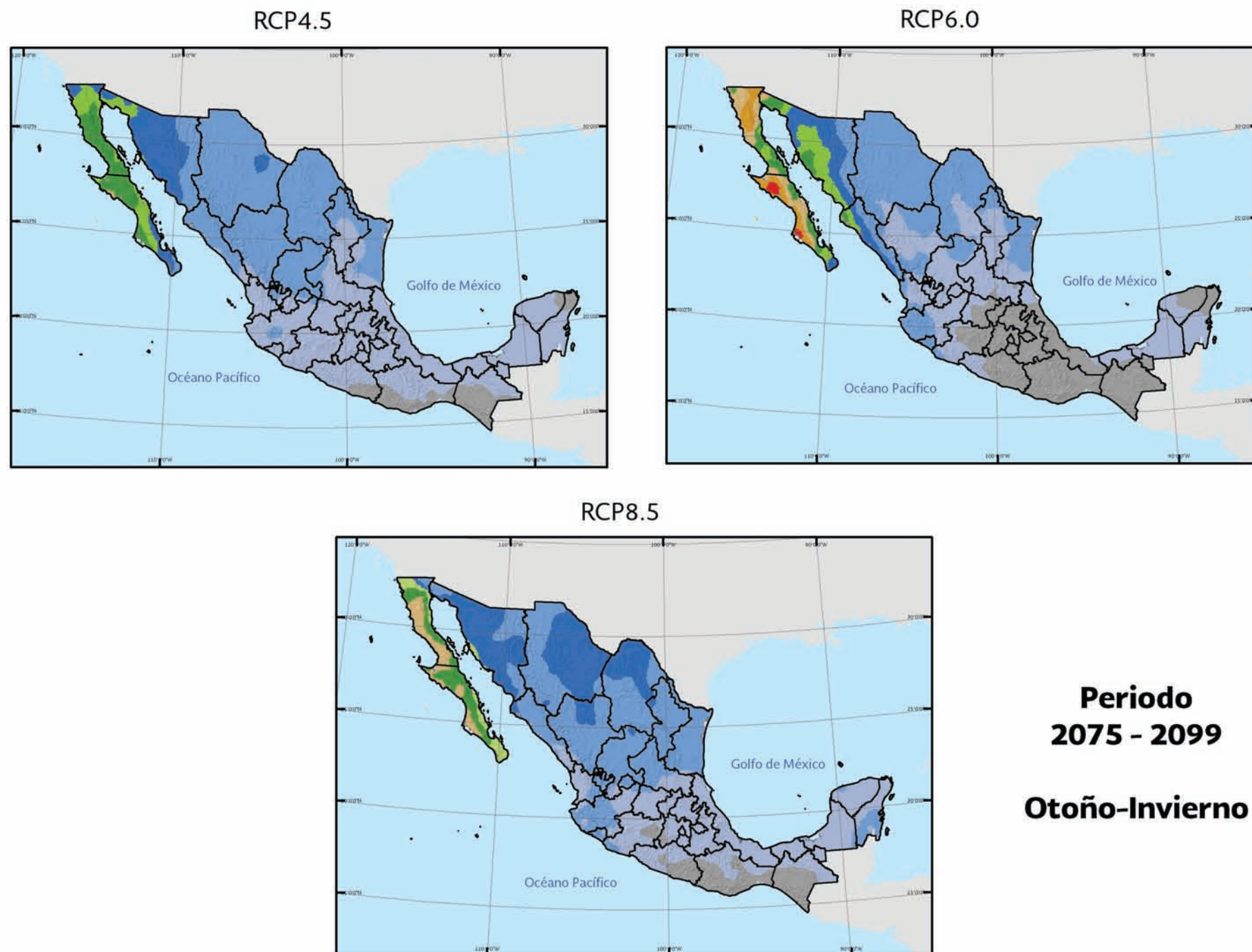
PROYECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN

Mapa 2.12



PROYECCIÓN DEL PORCENTAJE DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN

Mapa 2.13



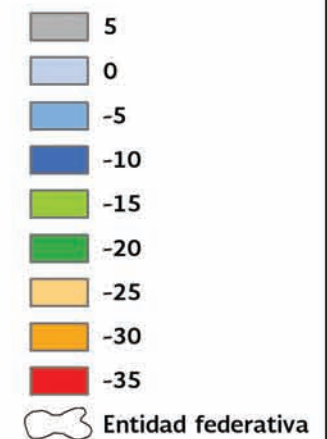
Periodo
2075 - 2099

Otoño-Invierno

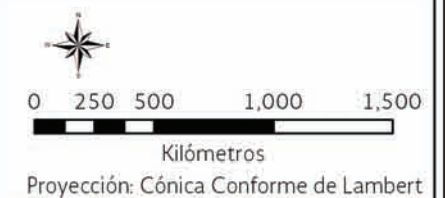


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Precipitación [%]

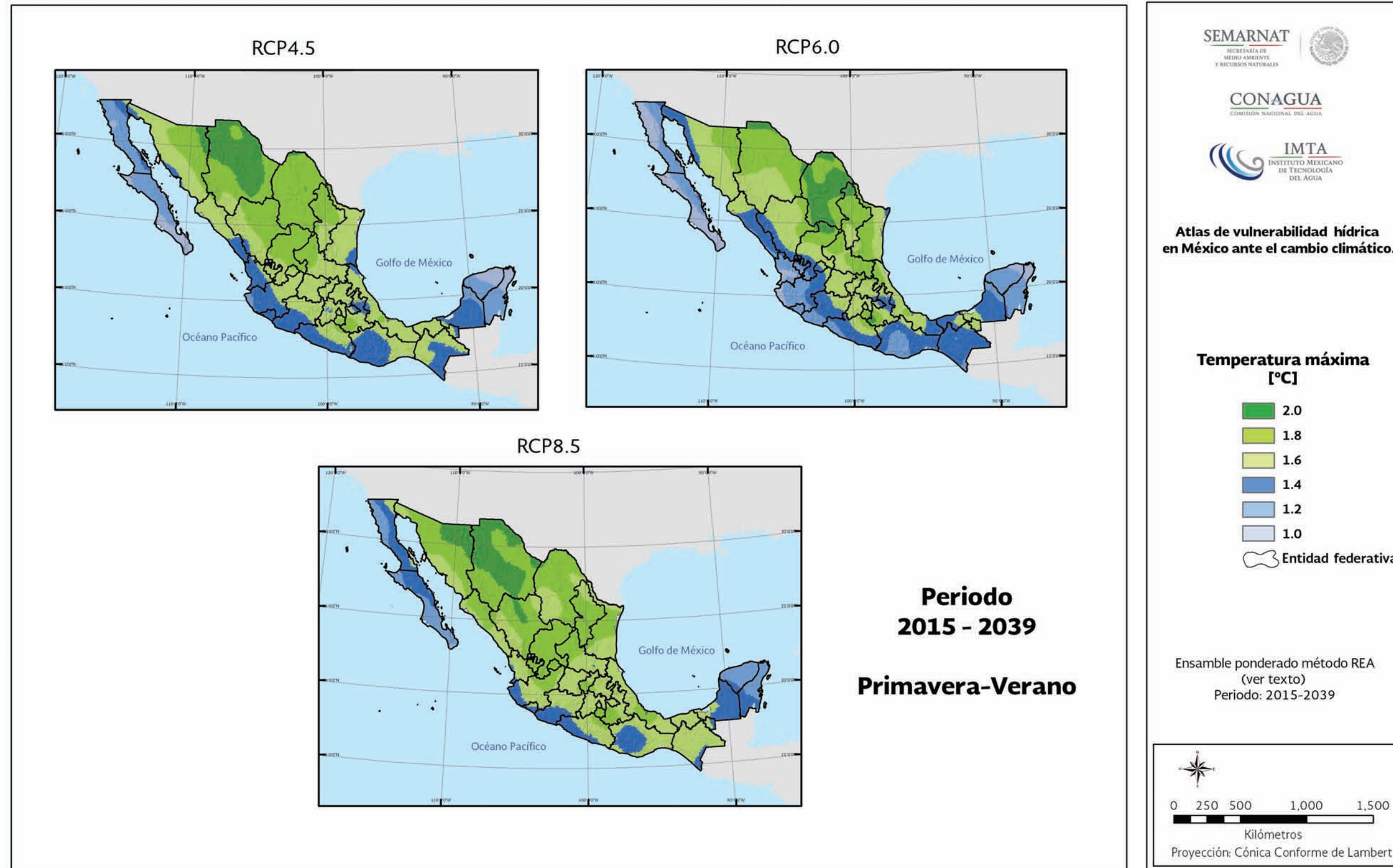


Ensamble ponderado método REA
(ver texto)
Periodo: 2075-2099



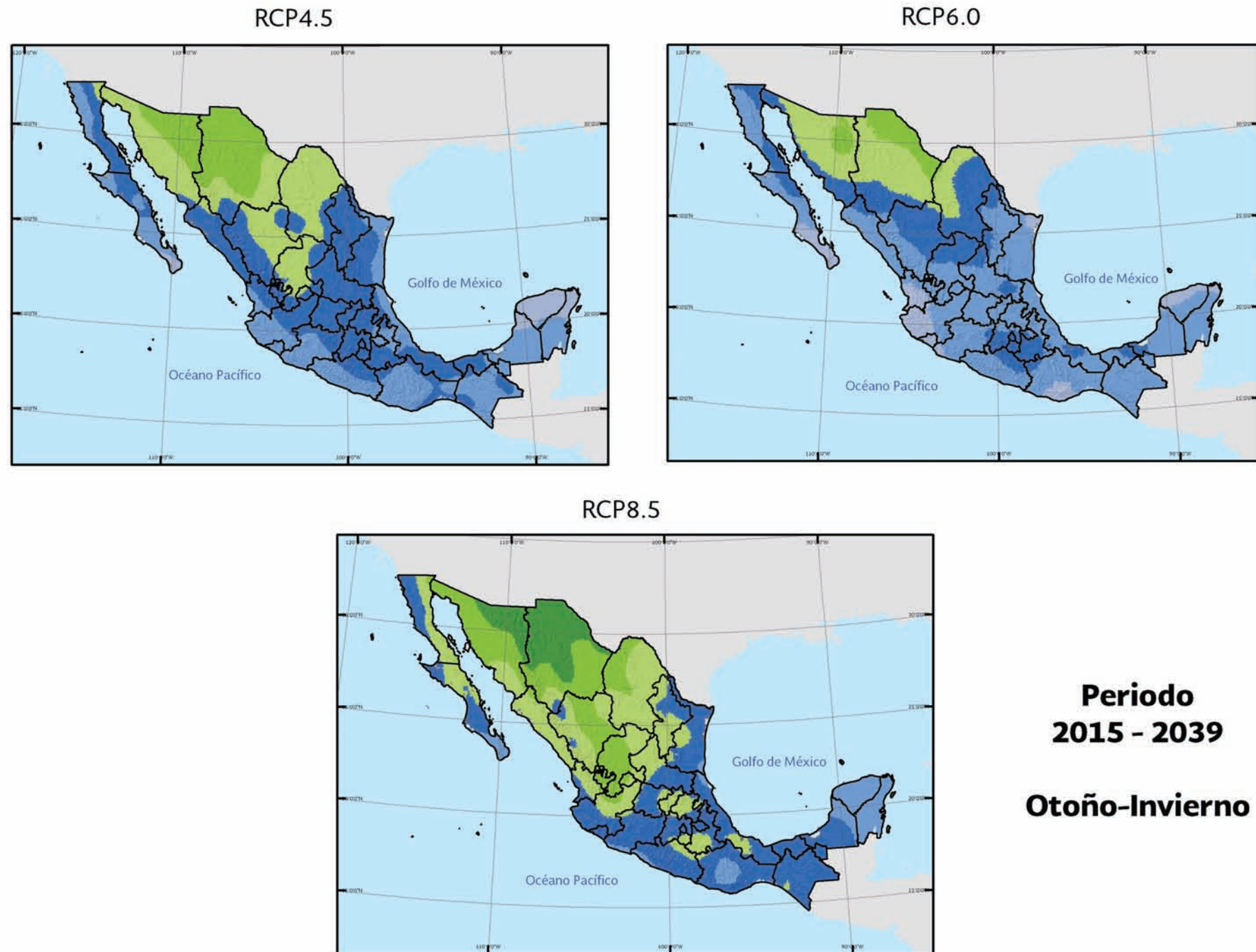
PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÁXIMA

Mapa 2.14



PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÁXIMA

Mapa 2.15

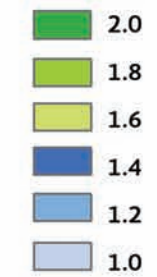


**Periodo
2015 - 2039
Otoño-Invierno**



**Atlas de vulnerabilidad hídrica
en México ante el cambio climático.**

**Temperatura máxima
[°C]**



Entidad federativa

Ensamble ponderado método REA
(ver texto)
Periodo: 2015-2039



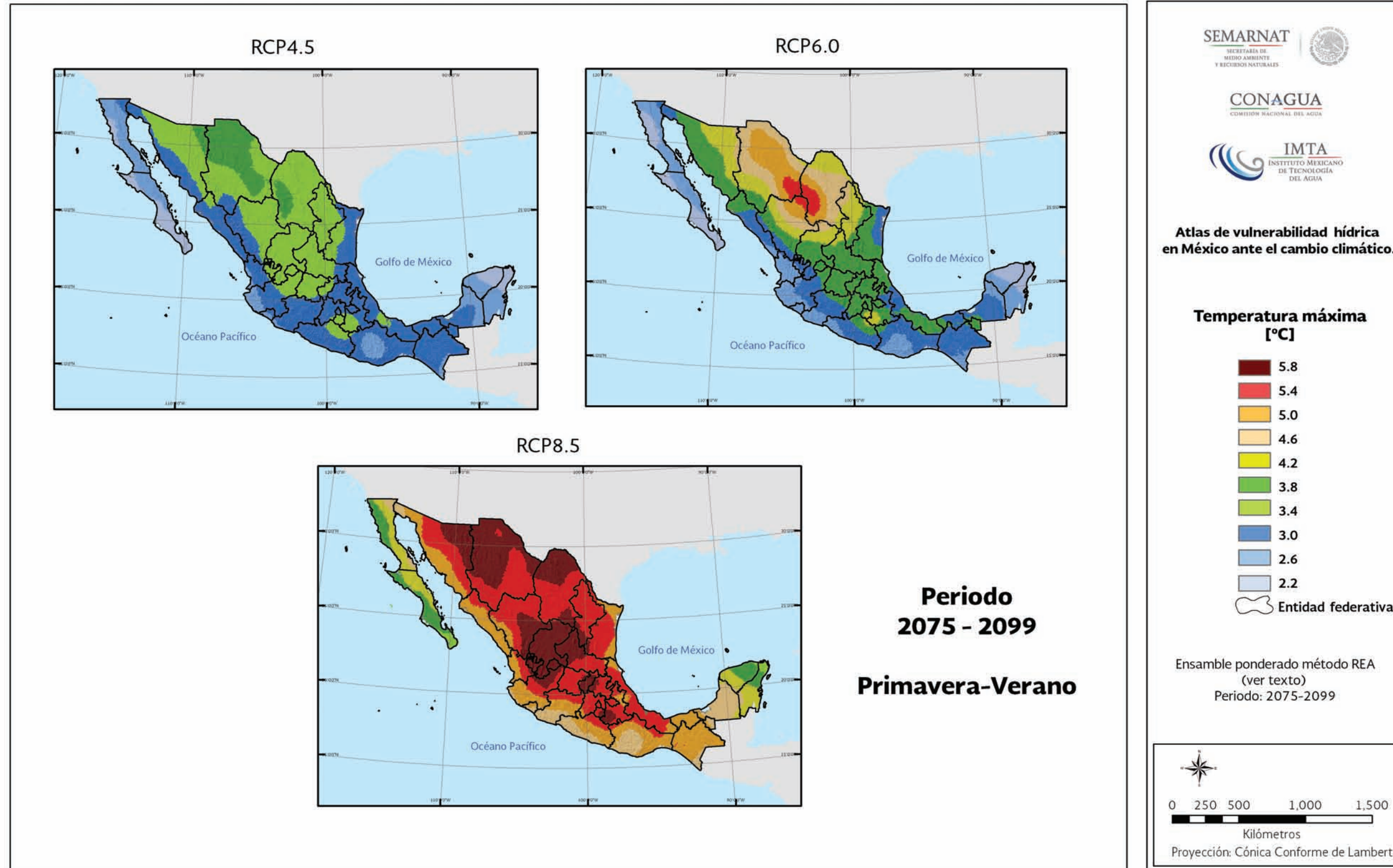
0 250 500 1,000 1,500

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

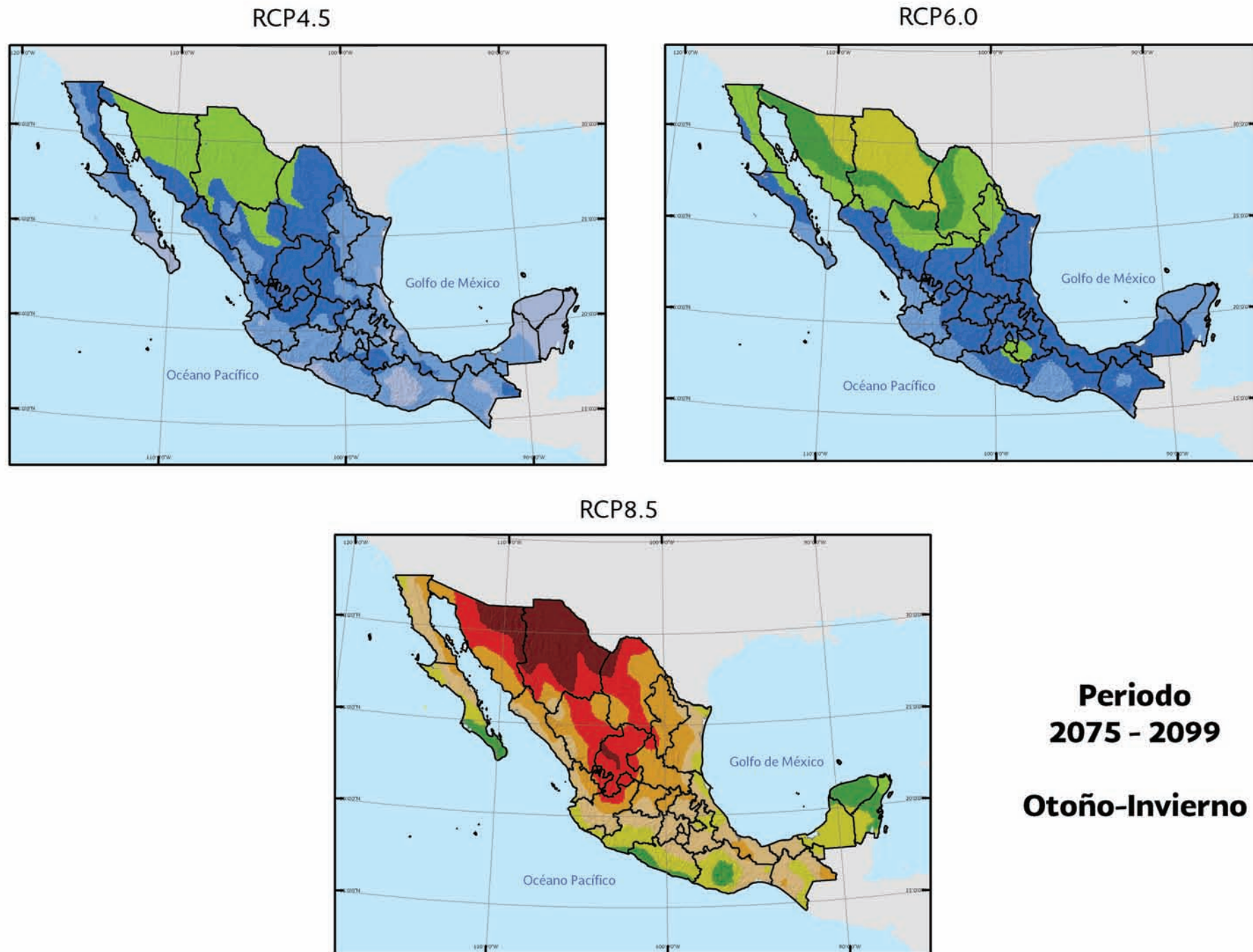
PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÁXIMA

Mapa 2.16



PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÁXIMA

Mapa 2.17

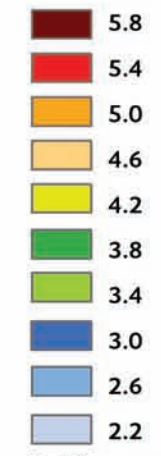


**Periodo
2075 - 2099**
Otoño-Invierno



**Atlas de vulnerabilidad hídrica
en México ante el cambio climático.**

**Temperatura máxima
[°C]**



Entidad federativa

Ensamble ponderado método REA
(ver texto)
Periodo: 2075-2099

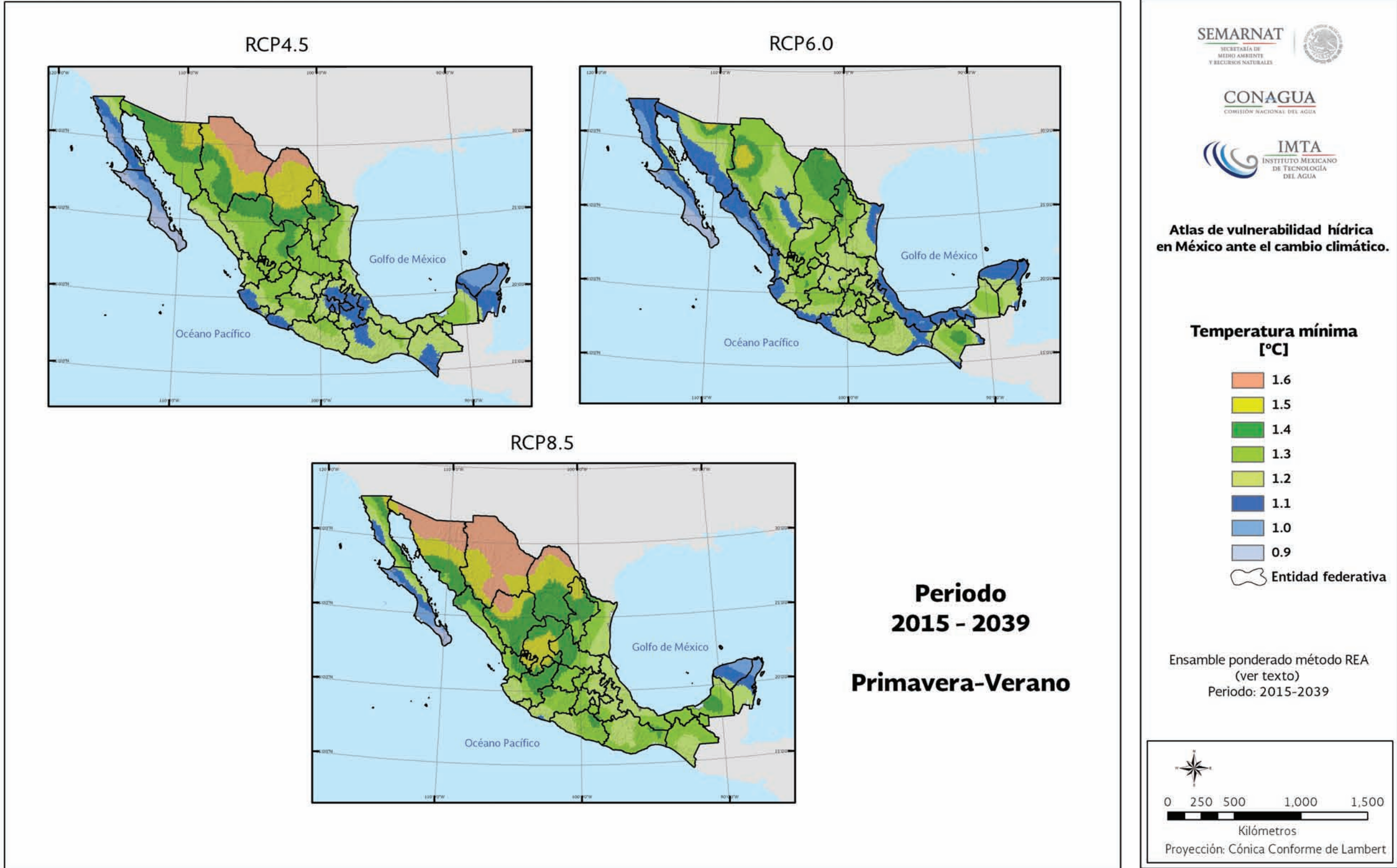


0 250 500 1,000 1,500

Kilómetros

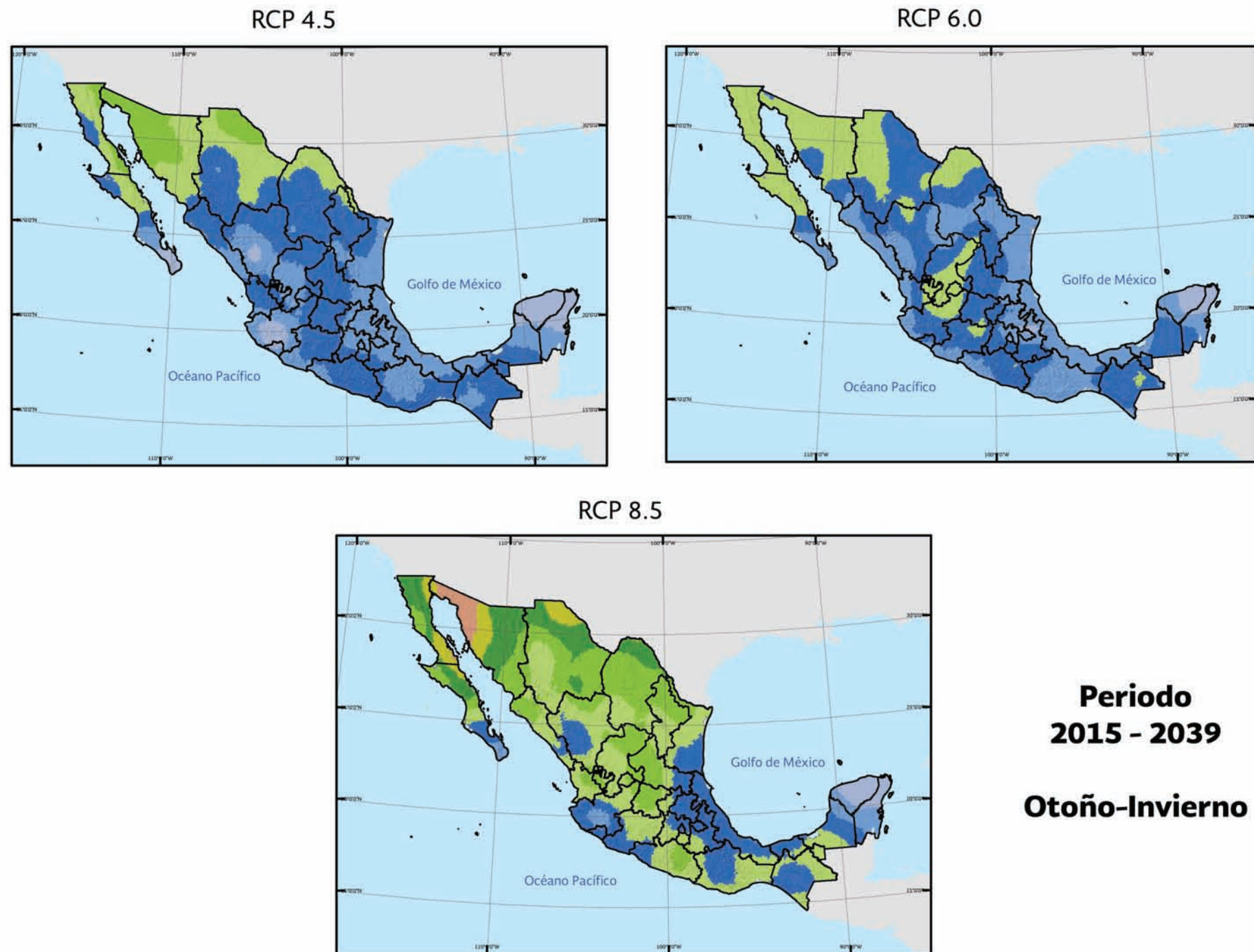
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÍNIMA Mapa 2.18



PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÍNIMA

Mapa 2.19



Periodo
2015 - 2039
Otoño-Invierno



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Temperatura mínima [°C]

- 1.6
- 1.5
- 1.4
- 1.3
- 1.2
- 1.1
- 1.0
- 0.9

Entidad federativa

Ensamble ponderado método REA
(ver texto)
Periodo: 2015-2039



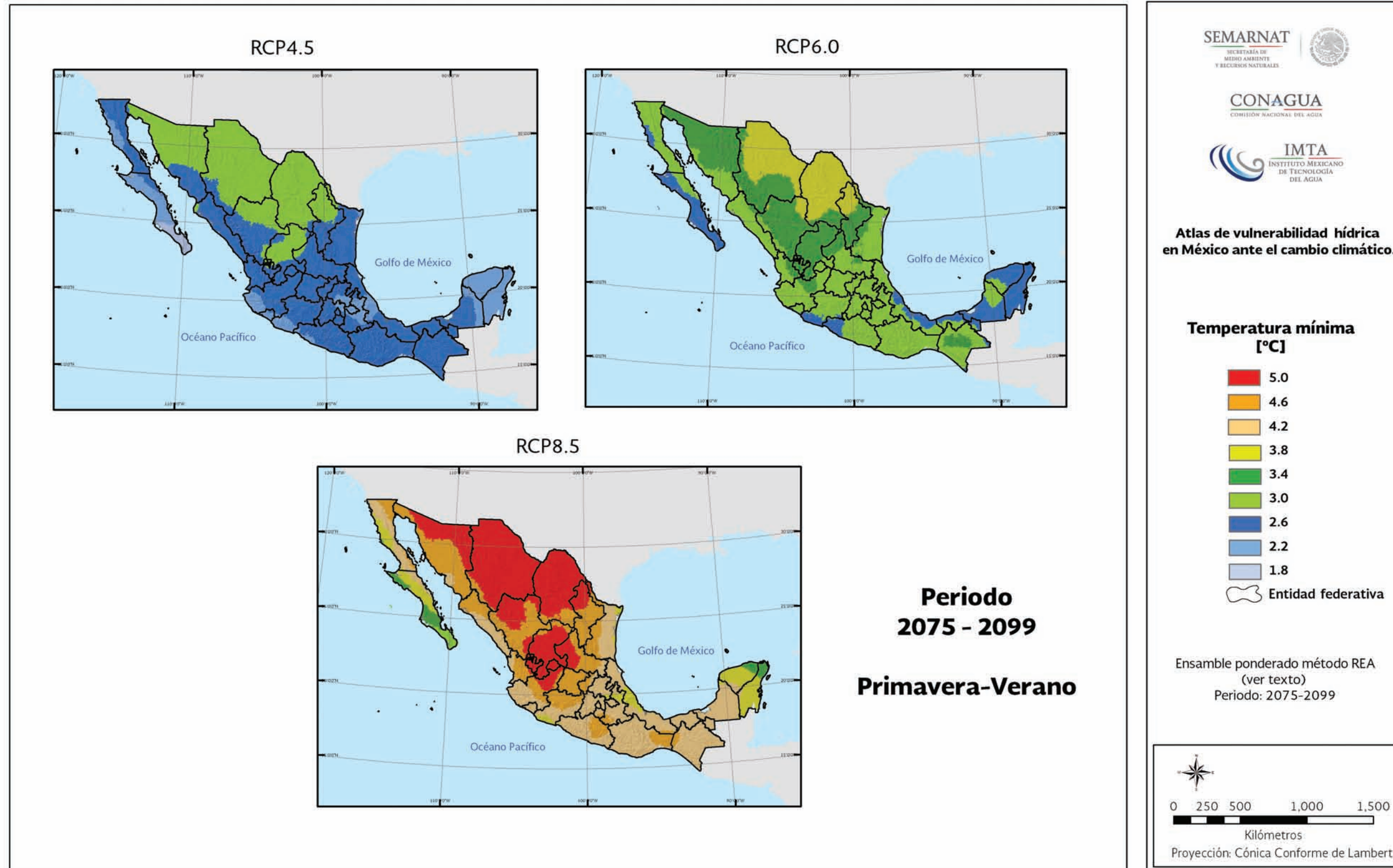
0 250 500 1,000 1,500

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

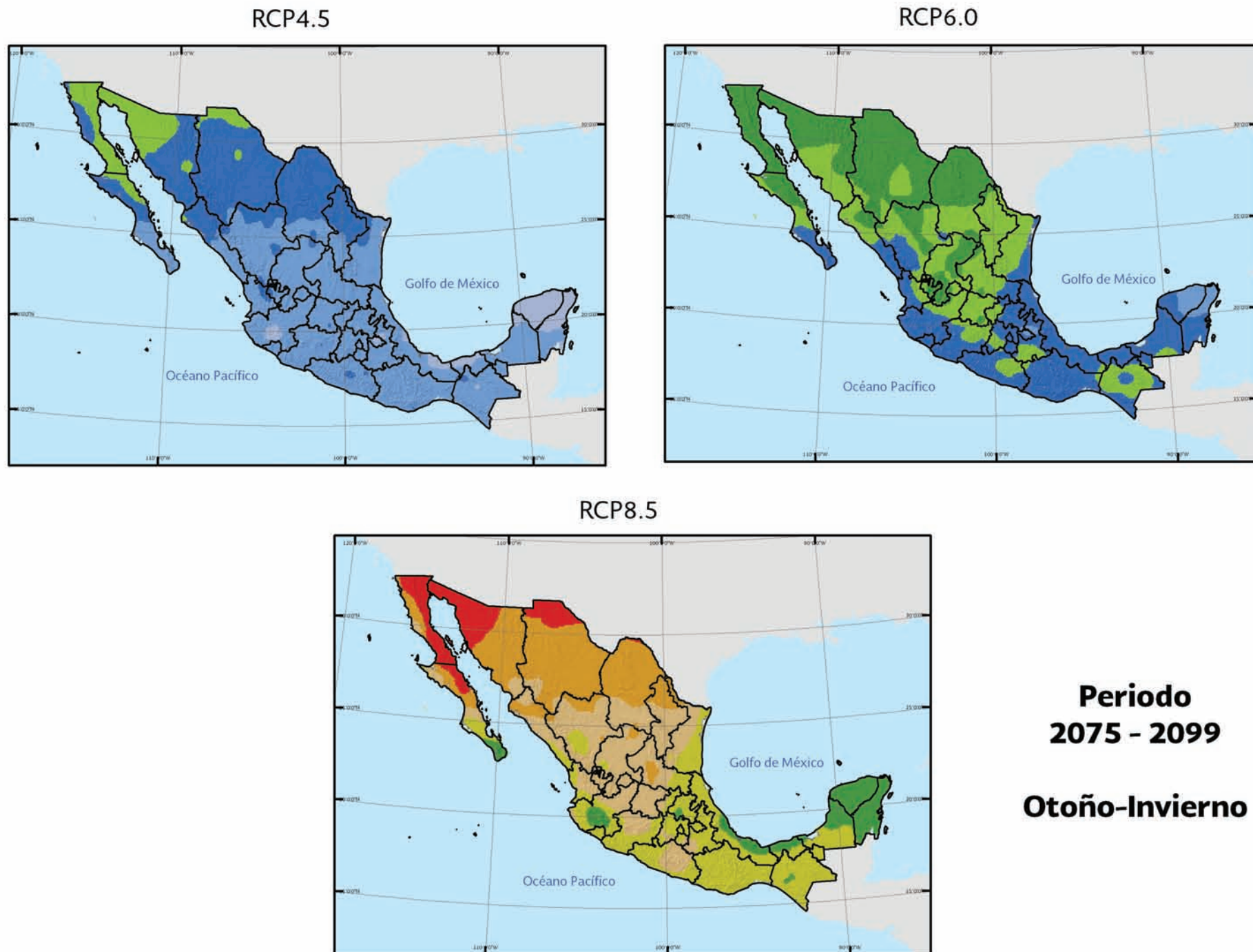
PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÍNIMA

Mapa 2.20



PROYECCIÓN DEL CAMBIO DE TEMPERATURA MÍNIMA

Mapa 2.21



**Periodo
2075 - 2099**
Otoño-Invierno



**Atlas de vulnerabilidad hídrica
en México ante el cambio climático.**

**Temperatura mínima
[°C]**

- 5.0
- 4.6
- 4.2
- 3.8
- 3.4
- 3.0
- 2.6
- 2.2
- 1.8

Entidad federativa

Ensamble ponderado método REA
(ver texto)
Periodo: 2075-2099



0 250 500 1,000 1,500

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

y Caribe se observan valores entre 19 y 21°C. En estados sin costas se observan temperaturas entre 7 y 11°C, con valores similares en Baja California Norte.

Una forma de analizar el desempeño de los modelos fue calcular el error medio absoluto tanto del promedio simple como del REA respecto a los datos del CRU. Para el periodo primavera-verano (mapa 2.4), los menores errores del promedio simple se observan en Baja California (menores a 10 mm), norte del país (de 10 mm a 40 mm) que corresponde a la región extra-tropical, ello podría estar asociado a que los modelos numéricos fueron desarrollados en países de latitudes medias y altas, donde se obtienen mejores desempeños que en regiones tropicales. Los valores intermedios: entre 20 mm y 60 mm, se observan en el centro, Pacífico sur y Península de Yucatán. En regiones centrales y montañosas el error aumenta hasta 60 mm y en el sureste: hasta de 70 mm, en el sur de Veracruz, Tabasco, y Chiapas, donde la precipitación es generada por procesos tropicales afectados por la abrupta orografía mexicana y la compleja relación de procesos atmosféricos tropicales y extra-tropicales, como las ondas del este y frentes fríos.

Utilizando el método REA, el cual pondera el desempeño de cada modelo, se observa una considerable disminución del error, sobre todo en Baja California, noroeste, norte y noreste, además del Pacífico sur, manteniendo los errores en el sur de la vertiente del Golfo de México y Península de Yucatán, donde los complejos sistemas atmosféricos afectan la distribución espacial de precipitación. Para el periodo otoño-invierno, los errores en la precipitación del promedio simple de los modelos son menores en el norte, aumentando hacia el sur hasta el centro del país, donde disminuyen nuevamente hasta costas del Pacífico, desde Colima hasta Chiapas (mapa 2.5) disminuyendo en la Península de Yucatán; en este periodo interactúan procesos tropicales, como ondas del este y huracanes, con frentes fríos, siendo más complicada la reproducción de esta dinámica atmosférica y sus impactos en precipitación. El máximo error se observa en el sur de Veracruz, Campeche y norte de Chiapas, donde convergen efectos tanto de eventos tropicales como extratropicales (ciclones y frentes fríos), además en el sur de Sinaloa y Nayarit, mientras que el mínimo error se observa en Baja California norte.

El ensamble REA disminuye los errores en forma significativa para el periodo otoño-invierno en todo el país, a excepción del sureste (mapa 2.5), los menores errores se observan en el noroeste (Baja California, Sonora y oeste de Chihuahua), mientras que se mantienen en sureste de México, donde es compleja la reproducción de la confluencia de eventos tanto tropicales como extratropicales.

En la temperatura máxima, durante periodo primavera-verano (mapa 2.6), se observa que la distribución de los errores sigue una distribución asociada a la orografía, los menores valores corresponden a Baja California, Coahuila, Nuevo León, sur de Durango y sureste, mientras que los máximos en costas del Pacífico, desde Jalisco hasta Oaxaca. Los máximos relativos en Sinaloa, Baja California Sur. En el método REA los errores disminuyen en todo el país, a excepción de costas de Michoacán y Oaxaca.

Para otoño-invierno, la temperatura máxima mantiene el patrón de errores respecto a primavera-verano en el promedio simple (mapa 2.7) disminuyendo los errores en el norte y manteniendo la influencia orográfica. Los máximos locales se observan en el norte de Sinaloa, costas de Michoacán y Guerrero y algunas regiones de Sonora, Chihuahua y Durango, mientras que los mínimos en la Sierra Madre Occidental, centro del país y regiones del sureste.

Como en el resto de los casos analizados, el ensamble REA disminuye los errores, en este caso es en Baja California, Sierra Madre Occidental y Oriental, Coahuila, Nuevo León, centro del país, sur de Veracruz, manteniendo los errores en Guerrero y Chiapas.

Para otoño-invierno en la temperatura mínima se mantiene el patrón de errores respecto a primavera-verano (mapa 2.8), donde los menores errores del promedio simple se observan en el noreste, norte y noroeste, así como en el sureste. Los errores máximos se observan en Baja California, Jalisco, Michoacán, Oaxaca y centro del país. En el ensamble ponderado los errores son menores en todo el país, manteniéndose en Baja California, costas de Jalisco y Oaxaca.

Para el periodo primavera-verano, en la temperatura mínima se observan los menores errores del promedio simple en el noreste, norte y noroeste (a excepción de Baja California), así como en Campeche y Quintana Roo (valores menores a 2°C; mapa 2.9). Los errores máximos se observan en Baja California, Sierra Madre Occidental, Jalisco, Michoacán, Colima, Oaxaca y centro del país. Utilizando el ensamble ponderado los errores disminuyen significativamente en todo el país, manteniéndose en Baja California Norte, Oaxaca.

Aplicando los forzantes radiativos de los escenarios mencionados, se estimó la proyección de porcentaje de cambio de precipitación para dos periodos 2015-2039 y 2075-2099, y para la climatología de dos semestres: primavera-verano y otoño-invierno. En el periodo 2015-2039 para primavera-verano se observa que en el escenario RCP4.5 se proyecta que la precipitación podría disminuir ligeramente en dicho periodo para toda la república (de 0 a 6%; mapa 2.10), mientras que el escenario RCP6.0 es el que proyecta los cambios más intensos en Sonora, Chihuahua y Coahuila, donde la precipitación podría disminuir hasta 15%. Para el centro y sur del país tanto el escenario RCP6.0 como el RCP8.5 coinciden en proyectar una disminución de precipitación de 12%.

En el caso del otoño-invierno para el mismo periodo se observa que la región más afectada sería Baja California Sur, donde en el escenario RCP6.0 se proyecta una posible disminución de hasta el 35% de la precipitación, seguido por el escenario RCP8.5 con valores de -25%. Similar al semestre anterior el escenario de bajas emisiones (RCP4.5) es el que proyecta las menores disminuciones de precipitación para toda la república mexicana (mapa 2.11).

En el periodo lejano (2075-2099) en primavera-verano, se observa en el escenario RCP6.0 que el porcentaje de disminución de precipitación sería menor que en el periodo cercano (2015-2039), para casi todo México, excepto en Sonora y la Península de Baja California donde la precipitación podría disminuir hasta 18%. El escenario RCP8.5 proyecta que la precipitación en primavera-verano en Sonora podría disminuir hasta 21%, y para la península de Yucatán hasta 18%, mientras que el resto del país se encuentra en un rango de -3% a -12%. El escenario RCP4.5 nuevamente es el escenario más optimista con disminuciones máximas de 9% en Sonora y Baja California, principalmente (mapa 2.12).

En la temporada de otoño-invierno sobre la Península de Baja California para el periodo lejano se observarían decrementos de precipitación de 20 a 35%, que comparado con el periodo cercano es ligeramente menor. En el periodo lejano se encuentra proyecciones de un posible aumento de precipitación de hasta 5% en Chiapas y Oaxaca en los tres escenarios, y para todo el centro del país en el escenario RCP6.0. Para la Península de Yucatán y en la meseta del norte los tres escenarios proyectan un disminución de la precipitación de hasta 10% (mapa 2.13).

Las proyecciones de cambio para la temperatura máxima durante primavera-verano ensamblando todos los modelos con el método REA bajo el escenario RCP4.5 para los años 2015-2039, serían valores positivos en toda la región (mapa 2.14), los valores máximos serían en el norte y centro del país (mayores a 1.6°C), a excepción de la Península de Baja California, donde esta proyección de cambio se estima entre 1 y 1.4°C, valores similares se observarían en la costa del Pacífico y Península de Yucatán, en general, los menores valores se observan en los litorales.

Bajo condiciones del escenario RCP6.0, para el mismo periodo se mantendrían los patrones espaciales de cambio, cuando se observarían valores máximos en la frontera norte, además de centro del país. Para Baja California se esperarían los menores cambios (menores a 1.2°C), en el Pacífico sur, entre Nayarit y Chiapas, para Yucatán, además del sureste, los cambios serían entre 1 y 1.4°C.

Bajo el escenario RCP8.5, las proyecciones de cambio mayores a 1.6°C se extenderían hacia el sur afectando zonas como el centro y sureste del país, además del noroeste y noreste, para el Pacífico sur los cambios serían entre 1 y 1.4°C, y en la península de Yucatán entre 1 y 1.2°C.

Durante otoño-invierno las proyecciones de cambio para la temperatura máxima aplicando el método REA bajo el escenario RCP4.5 para los años 2015-2039, mostrarían valores positivos en la región de análisis (mapa 2.15), sus valores máximos serían mayores a 2°C en el noroeste del país y a 1.8°C en el norte. Para el resto del país esta proyección de cambio sería menor a 1.4°C, con mínimos en las penínsulas de Baja California y Yucatán, además del litoral del Golfo de México y costas del Pacífico desde Sinaloa hasta Chiapas.

En el escenario RCP6.0, para el mismo periodo, el área de cambios mayores a 1.7°C se mantiene en Sonora, reduciéndose en Chihuahua, Coahuila y norte de Durango, para el resto de México se observarían cambios entre 1 y 1.4°C.

Considerando el escenario RCP8.5, las proyecciones de cambio mayores a 1.6°C se observarían en el noroeste y norte de México, extendiéndose hacia el sur en Durango, San Luis Potosí, Jalisco y Guanajuato. Los cambios bajo este escenario serían entre 1 y 1.4°C para Baja California, Pacífico sur, vertiente del Golfo de México y sureste, la península de Yucatán mantendría los menores cambios.

En las proyecciones de cambio para la temperatura máxima en primavera-verano, integrando todos los modelos mediante el método REA bajo el escenario RCP4.5 para el futuro lejano, 2075-2099, podrían observarse proyecciones de cambio menores de 3.8°C en el norte y parte central de México (mapa 2.16); en ambos litorales sus valores serían menores de 3°C, mientras que en Baja California, Península de Yucatán y Chiapas, sus valores serían los menores (2.2°C).

En condiciones del escenario RCP6.0, los máximos cambios se observarían en la colindancia de los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango (de 4.6 a 5.4°C), en Baja California, sur de la costa del Pacífico y Península de Yucatán habría los menores valores (menores a 2.6°C), y los intermedios en el resto del país.

Para el escenario RCP8.5, las proyecciones de cambio mayores a 5.4°C afectarían a la mayor parte del país, con excepción de los litorales, donde se observarían valores entre 3.4 y 4.6°C, los menores cambios se observarían en las penínsulas de Baja California y Yucatán.

Las proyecciones de cambio para la temperatura máxima utilizando el método REA bajo el escenario RCP4.5 en otoño-invierno para los años 2075-2099 mostrarían los valores mayores entre 3.4 y 3.8°C en el norte de Sonora, Chihuahua, este de Coahuila y norte de Durango; valores medianos: cercanos a 3°C para la meseta central y bajos; menores a 2.6°C en los litorales (mapa 2.17).

Para el escenario RCP6.0, se incrementarían los valores máximos respecto al caso anterior: oscilando entre 3.4 y 4.2°C, los mínimos se observarían en el sur de Baja California Sur y zonas costeras desde Nayarit hasta Chiapas, además de Yucatán y Quintana Roo e intermedios (entre 2.8 y 3°C) para el resto del país.

En el escenario RCP8.5, las proyecciones de cambio mayores a 5°C se observarían en el norte, noroeste y centro de México, con máximos locales en el norte de Sonora, Chihuahua y Coahuila. Para la península de Yucatán, Baja California Sur y ambos litorales se observarían los menores valores: entre 3.4 y 4.2°C.

En las proyecciones de cambio para la temperatura mínima en primavera-verano bajo el escenario RCP4.5 para el futuro cercano: (2015-2039) se podrían observar los mayores cambios: 1.6°C en la zona fronteriza de Sonora y Coahuila (mapa 2.18), para el resto del país podrían observarse valores entre 1.2 y 1.4°C, a excepción de las penínsulas de Baja California y Yucatán, donde se podrían identificar los menores cambios: de 0.8°C.

En condiciones del escenario RCP6.0, los máximos cambios se observarían en pequeñas zonas de Sonora y Chihuahua, los valores intermedios: entre 1.2 y 1.4°C se identificarían en la mayor parte del país, a excepción de Baja California Sur, donde habría los mínimos valores (de 0.9 a 1°C).

Para el escenario RCP8.5, las proyecciones de cambio mayores a 1.6°C podrían observarse en el norte de Sonora, Chihuahua y Durango, los valores intermedios: entre 1.2 y 1.5°C se observarían en el resto del país, con excepción en Baja California sur, Yucatán y Quintana Roo.

El cambio de la temperatura mínima bajo el escenario RCP4.5 en otoño-invierno para el periodo 2015-2039 tendría valores menores de 1.1°C en la mayor parte del territorio nacional (mapa 2.19), los valores menores de 0.9°C se localizarían en algunas zonas del sureste de Durango, de Jalisco, centro del país y Yucatán. Los valores mayores se observarían en la frontera norte (de 1.2 a 1.4°C).

Bajo condiciones del escenario RCP6.0, se tendrían cambios pequeños en el territorio mexicano, con valores máximos cercanos a 1.2°C en el noroeste, norte y centro, manteniéndose la distribución espacial en el centro sur y sureste del país respecto al escenario anterior.

Aplicando el escenario RCP8.5, los cambios más altos (mayores a 1.6°C) se detectarían en la región fronteriza de Sonora, para el resto del norte se observarían cambios entre 1.2 y 1.5°C. Los cambios en rangos intermedios se observarían en la vertiente del Golfo de México, costas de Jalisco, Colima y Michoacán, centro de Oaxaca y sureste de Durango; los menores valores se observarían en la Península de Yucatán y porción sur de Baja California.

Las proyecciones de cambio para la temperatura mínima en primavera-verano en el escenario RCP4.5 para el futuro lejano: 2075-2099, mostraría como rango máximo 3°C, ocurriendo ello en el norte del país (mapa 2.20), en el resto del país se observarían valores homogéneos: 2.6°C aproximadamente, con valores mínimos en las Penínsulas de Baja California y Yucatán.

En condiciones del escenario RCP6.0, los máximos cambios se observarían en el norte de Sonora, Chihuahua, Coahuila y Nuevo León, valores cercanos a 3.8°C en Durango y Zacatecas. En ambos litorales se observarían valores menores a 3.4°C; los mínimos valores (2.6°C) se observarían en el sur de Baja California, sureste y Península de Yucatán, así como en costas de Michoacán y Oaxaca.

Para el escenario RCP8.5, los mayores cambios se esperarían en Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí: 5°C. Los rangos de cambio entre 4.2 y 4.6°C se observarían en Baja California Norte y ambos litorales, mientras que los menores cambios se registrarían en el sur de Baja California y Yucatán (3.0°C aproximadamente).

Finalmente, los cambios asociados al escenario RCP4.5 de temperatura mínima durante otoño-invierno para el periodo 2075-2099 tendrían los valores menores

en el sur de México; los mayores se observarían en la Península de Baja California y los menores en Yucatán y Quintana Roo (mapa 2.21).

En el escenario RCP6.0, los cambios menores se localizarían en la porción sur de ambos litorales, además en el sur y sureste del país (menores a 2.6°C), mientras que los mayores en el norte, con máximos en el norte, noreste y noroeste: 3.4°C.

Bajo el escenario RCP8.5, los mayores cambios se observarían en Baja California Norte, noroeste de Sonora y norte de Chihuahua: 5°C; los cambios intermedios se localizarían en el norte, centro: entre 4.2 y 4.6°C; en el sur y sureste habría los menores valores: entre 3 y 3.8°C.

PROYECCIONES FUTURAS POR ENTIDAD FEDERATIVA

En el caso de las proyecciones de porcentaje de cambio de precipitación para el periodo lejano (cuadro 2.2) se observa que en primavera-verano los estados con valores mayores de decremento son Sonora, Yucatán y Campeche (-8 % a -17%); mientras que Zacatecas, Baja California Sur, Sinaloa, Aguascalientes, Chihuahua, Nayarit, Durango tienen los valores más pequeños (de -2.7 a -10.2); en este periodo del año se observó que los mayores decrementos fueron simulados por el escenario RCP8.5. Para el periodo otoño-invierno hay mayores discrepancias entre los escenarios de radiación, ya que el escenario RCP6.0 proyecta incrementos en el porcentaje de contribución de la precipitación, principalmente para los estados de Tlaxcala, Oaxaca, Chiapas, Distrito Federal, Morelos y Estado de México (de 1.5 a 2.6%), mientras que el resto de los escenarios proyectan decremento en dicha variable (de 0 a 2.6%). Por otro lado, el RCP6.0 a su vez también proyecta los mayores decrementos para la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (de -11.5 a 25.5%), incluso más que el escenario RCP8.5 (-6.7% a 21.3% para los mismos estados).

Respecto a las proyecciones de temperatura máxima y mínima por entidad federativa se observa que el escenario RCP8.5 dobla casi lo proyectado por el escenario RCP4.5, mientras que el escenario RCP6.0 proyecta incrementos intermedios más cercanos a lo proyectado por el escenario RCP4.5.

En las proyecciones de temperatura máxima (cuadro 2.2) el escenario RCP8.5 es el más dramático con incrementos mayores o iguales de 5.5°C (de 3.0 a 4.1 para los escenarios RCP4.5 y RCP6.0) para los estados de Querétaro, Durango, Aguascalientes y Zacatecas. Los estados que podrían tener los menores incrementos son la península de Baja California, Yucatán y Quintana Roo (de 2.1 a 3.9°C). Para el periodo otoño-invierno las proyecciones de cambio mayores se esperarían en Coahuila, Aguascalientes, Zacatecas, Sonora, Durango y Chihuahua (de 2.8 a 5.5°C), mientras que los que tienen las menores proyecciones son Baja California Sur, Oaxaca, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (de 2 a 4°C).

Las proyecciones de cambio de temperatura mínima para primavera-verano (cuadro 2.2) son altas para Nuevo León, Sonora, Zacatecas, Durango, Aguascalientes, Coahuila y Chihuahua (de 2.5 a 4.9°C), mientras que los estados con los valores más pequeños son Tlaxcala, Hidalgo, Veracruz, Yucatán, Quintana Roo y Baja California Sur (de 1.9 a 3.9°C). Para el otoño-invierno los estados con los mayores incrementos en la temperatura mínima son Nuevo León, Durango, Coahuila, Chihuahua, Sonora y Baja California (de 2.2 a 4.7°C). Por otro lado, los estados que podrían presentar los menores incrementos son Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo (de 1.7 a 3.4°C).

CONCLUSIONES

La distribución espacial de la precipitación observada en México tanto para el periodo primavera-verano como otoño-invierno de 1971-2000, refleja la influencia orográfica y costera, con valores máximos de precipitación en el sureste, extremos en Chiapas y norte de Oaxaca e intermedios en la vertiente del Golfo de México y costa sur del Pacífico. Estas precipitaciones están asociadas a eventos atmosféricos generados tanto en los trópicos como extra-trópicos, como sistemas convectivos de mesoescala, frentes fríos y ondas del este, huracanes y Monzón de Norteamérica, principalmente. En la temperatura máxima durante primavera-verano en la frontera norte y mayoría de las zonas costeras se observan los menores cambios, mientras que en las zonas centrales y Baja California Sur la variación es mayor. En otoño-invierno, en ambos litorales la temperatura tiene mayores cambios espaciales. Mientras que la distribución de temperatura mínima durante primavera-verano tiene valores mayores en la vertiente del Golfo de México, estado de Guerrero y costas del Caribe, así como el sureste y Península de Yucatán; los menores valores se registraron en el norte de costas del Pacífico y sur de Baja California.

Se calculó el MAE para validar el promedio simple y el promedio REA de los 14 MCG, donde se encontró que el desempeño de los modelos en precipitación es mejor en la zona norte del país. Ello podría estar asociado a que los modelos numéricos fueron desarrollados en países de latitudes medias y altas. Por otra parte, en el sureste, donde la precipitación es generada por procesos tropicales afectados por la abrupta orografía mexicana y la compleja relación de procesos atmosféricos tropicales y extra-tropicales, como las ondas del este y frentes fríos, los modelos obtienen desempeños más bajos. En el método REA, el cual pondera el desempeño de cada modelo, se observa una considerable disminución del error, sobre todo en Baja California, noroeste, norte y noreste, además del Pacífico sur, manteniendo los errores altos en el sur de la vertiente del Golfo de México y Península de Yucatán. En el caso de la temperatura máxima y mínima, se observó que la distribución de los errores está asociada a la orografía; los menores valores corresponden a Baja California, Coahuila, Nuevo León, sur de Durango y sureste, mientras que los máximos en costas del Pacífico, desde Jalisco hasta Oaxaca. En el caso de la temperatura máxima, al utilizar el método REA los errores disminuyen en todo el país, a excepción de costas de Michoacán y Oaxaca, mientras que en la mínima los errores disminuyen en todo el país, manteniéndose en Baja California, costas de Jalisco y Oaxaca.

La proyección de porcentaje de cambio de precipitación para el periodo futuro 2015-2039 muestra en el escenario RCP4.5 que la precipitación podría disminuir ligeramente en dicho periodo para toda la república (de 0 a 6%), mientras que el escenario RCP6.0 proyecta los cambios más intensos en Sonora, Chihuahua y Coahuila donde la precipitación podría disminuir hasta 15%. En el periodo 2075-2099 para primavera-verano se observa en el escenario RCP6.0 que el porcentaje de disminución de precipitación sería menor que en el periodo cercano (2015-2039) para casi todo México, excepto en Sonora y la Península de Baja California, donde la precipitación podría disminuir hasta 18%. El escenario RCP8.5 proyecta que la precipitación en primavera-verano en Sonora podría disminuir hasta 21%, y para la península de Yucatán hasta 18%, mientras que el resto del país se encuentra en un rango de -3 a -12%.

Las proyecciones de cambio de temperatura mínima bajo el escenario RCP4.5 para el periodo 2015-2039 dan valores positivos en toda la región; los valores máximos serían en el norte y centro del país (mayores a 1.6°C), a excepción de la Península de Baja California, donde esta proyección de cambio podría ser entre 1 y 1.4°C; valores similares se observarían en la costa del Pacífico y Península de Yucatán.

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Cuadro 2.2. Proyecciones de cambio de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima por entidad federativa bajo los tres escenarios de radiación en primavera-verano (marzo - agosto) y otoño-invierno (septiembre-febrero) para el periodo lejano 2075-2099.

Entidad Federativa	Precipitación [%]						Temperatura Máxima [°C]						Temperatura Mínima [°C]					
	Primavera-Verano			Otoño-Invierno			Primavera-Verano			Otoño-Invierno			Primavera-Verano			Otoño-Invierno		
	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Aguascalientes	-3.6	-2.7	-9.3	-5.6	-1.6	-6.3	3.2	3.5	5.6	2.8	2.8	5.2	2.5	2.9	4.8	2.0	2.9	4.0
Baja California	-7.8	-11.7	-11.2	-17.2	-25.5	-19.4	2.4	2.7	3.9	2.7	3.2	4.4	2.3	2.8	4.1	2.7	3.3	4.7
Baja California Sur	-8.5	-10.2	-9.5	-15.9	-25.3	-21.3	2.1	2.5	3.6	2.3	2.6	4.0	1.9	2.4	3.3	2.2	2.7	3.9
Campeche	-7.9	-9.5	-15.2	-2.2	-1.1	-3.7	2.6	3.1	4.4	2.2	2.7	4.0	2.2	2.6	4.0	1.9	2.5	3.4
Coahuila	-5.8	-7.5	-10.5	-6.9	-6.2	-9.7	3.3	4.4	5.4	2.8	3.4	5.0	2.8	3.6	4.8	2.3	3.0	4.3
Colima	-7.0	-6.5	-11.4	-3.7	-6.6	-5.5	2.6	2.8	4.6	2.4	2.4	4.2	2.2	2.7	4.0	2.0	2.4	3.5
Chiapas	-6.4	-6.2	-10.6	0.2	2.4	0.6	2.7	3.1	4.8	2.3	2.6	4.2	2.3	2.9	4.0	2.0	2.6	3.6
Chihuahua	-4.2	-7.5	-8.5	-8.2	-7.1	-10.2	3.3	4.4	5.4	3.2	3.8	5.5	2.8	3.4	4.9	2.4	3.1	4.4
Distrito Federal	-7.7	-7.6	-13.8	-2.0	1.8	-2.6	2.9	3.6	5.2	2.4	3.0	4.3	2.2	2.9	4.0	1.9	2.4	3.5
Durango	-3.5	-5.7	-7.5	-7.0	-4.9	-8.7	3.2	4.1	5.5	3.0	3.3	5.3	2.7	3.2	4.8	2.2	3.0	4.2
Guanajuato	-4.6	-4.3	-11.5	-3.3	0.2	-3.3	3.1	3.6	5.3	2.6	2.9	4.6	2.3	2.8	4.4	2.1	2.8	4.0
Guerrero	-6.7	-6.5	-12.5	-0.8	1.4	0.2	2.9	3.3	4.8	2.4	2.8	4.1	2.3	2.8	4.1	2.1	2.6	3.8
Hidalgo	-6.4	-5.9	-12.7	-2.3	0.5	-3.4	2.9	3.5	5.3	2.5	2.9	4.5	2.2	2.8	3.9	1.9	2.4	3.5
Jalisco	-5.6	-5.4	-11.5	-4.3	-4.0	-6.0	2.9	3.1	5.2	2.5	2.6	4.7	2.4	2.9	4.4	1.9	2.6	3.6
México	-6.7	-6.1	-13.1	-2.0	1.5	-2.2	2.9	3.6	5.2	2.5	2.9	4.4	2.3	2.8	4.0	2.0	2.5	3.6
Michoacán	-4.8	-4.5	-11.6	-2.5	0.1	-2.0	2.9	3.3	5.0	2.5	2.7	4.3	2.3	2.8	4.3	2.0	2.6	3.8
Morelos	-7.2	-7.9	-13.2	-1.9	1.6	-1.5	3.2	3.8	5.4	2.6	3.1	4.4	2.3	2.8	4.1	2.1	2.5	3.8
Nayarit	-4.0	-6.3	-8.4	-4.1	-4.9	-4.6	2.7	2.8	5.0	2.5	2.5	4.5	2.4	2.9	4.3	2.1	2.5	3.8
Nuevo León	-7.5	-7.5	-12.9	-5.0	-4.7	-7.9	3.1	4.0	5.3	2.5	3.0	4.7	2.6	3.4	4.5	2.2	2.8	4.1
Oaxaca	-7.6	-7.4	-13.6	-0.4	2.4	0.2	2.6	3.1	4.7	2.2	2.6	4.0	2.3	2.8	4.0	2.0	2.4	3.5
Puebla	-7.3	-8.0	-12.7	-1.4	1.4	-2.1	2.9	3.6	5.2	2.5	2.9	4.4	2.2	2.8	4.0	1.9	2.5	3.6
Querétaro	-5.7	-4.7	-12.7	-2.8	0.7	-3.5	3.0	3.6	5.5	2.6	2.9	4.7	2.3	2.8	4.3	2.0	2.7	3.8
Quintana Roo	-6.5	-5.6	-14.1	-0.5	0.3	-3.8	2.2	2.5	3.7	2.0	2.4	3.5	2.0	2.4	3.5	1.7	2.2	3.1
San Luis Potosí	-5.6	-6.1	-11.7	-3.7	-1.2	-5.1	3.1	3.7	5.4	2.6	2.9	4.8	2.5	2.9	4.4	2.1	2.7	3.9
Sinaloa	-5.2	-7.4	-9.5	-5.9	-11.5	-6.7	2.8	3.2	4.9	2.6	2.8	4.6	2.4	2.8	4.2	2.2	2.7	4.0
Sonora	-8.7	-12.4	-16.9	-10.6	-13.0	-10.6	3.1	3.8	5.2	3.2	3.7	5.3	2.7	3.1	4.5	2.6	3.1	4.5
Tabasco	-6.8	-9.1	-12.7	-1.5	-0.5	-3.2	2.9	3.4	4.8	2.4	2.8	4.3	2.2	2.6	4.0	1.9	2.4	3.4
Tamaulipas	-7.9	-8.5	-13.4	-5.0	-5.0	-7.7	3.0	3.6	5.2	2.4	2.8	4.5	2.4	3.0	4.2	2.1	2.7	3.9
Tlaxcala	-7.8	-7.8	-12.8	-0.9	2.6	-1.9	2.9	3.5	5.2	2.5	2.9	4.4	2.2	2.8	3.9	1.9	2.4	3.6
Veracruz	-7.4	-8.5	-12.2	-2.1	1.1	-2.5	2.9	3.5	5.2	2.5	2.8	4.3	2.2	2.8	3.9	1.9	2.4	3.5
Yucatán	-7.7	-7.7	-16.9	-1.0	0.0	-4.1	2.2	2.6	3.8	2.0	2.4	3.5	2.0	2.5	3.6	1.7	2.2	3.2
Zacatecas	-4.0	-4.7	-9.7	-5.6	-2.9	-6.7	3.2	3.6	5.7	2.8	2.8	5.2	2.6	3.1	4.8	2.1	3.1	4.0

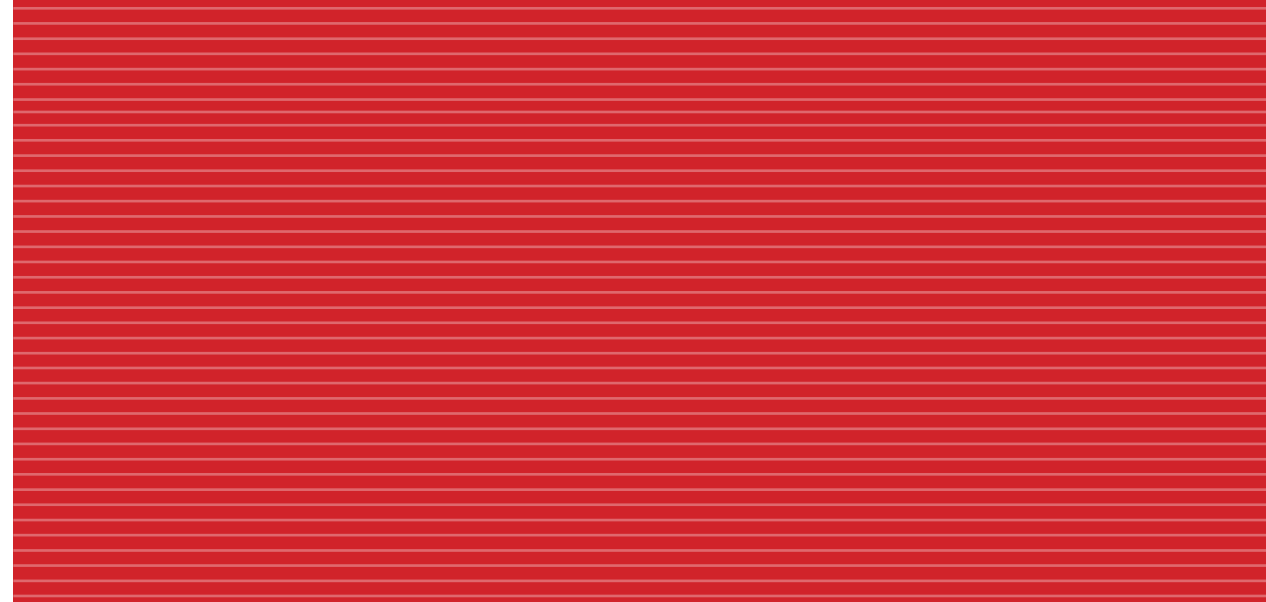
En general, los menores valores se observan en los litorales. Bajo condiciones del escenario RCP6.0; para el mismo periodo se mantendrían los patrones espaciales de cambio, cuando se observarían valores máximos en la frontera norte, además de centro del país. Aplicando el escenario RCP8.5, las proyecciones de cambio mayores a 1.6°C se extenderían hacia el sur afectando zonas como el centro y sureste del país, además del noroeste y noreste; para el Pacífico sur los cambios serían entre 1 y 1.4°C, y en la península de Yucatán entre 1 y 1.2°C.

En síntesis, la comparación tanto de los modelos globales como de su ensamble (REA) contra los datos del CRU, se observa que no es posible estimar un modelo único como el de mejor desempeño, ya que éste no es homogéneo, es decir, el mismo modelo no estima adecuadamente todas las variables. Por ello es fundamental comprender las causas, analizando los efectos locales como la influencia de la abrupta orografía mexicana en la dinámica atmosférica, los efectos de los océanos adyacentes a México en el clima regional mexicano, la ubicación e intensidad de la precipitación asociada a la zona de convergencia intertropical, la intensidad y ubicación de la corriente del pacífico de niveles altos y su relación energética con los frentes fríos, la intensidad y variabilidad estacional de la corriente en chorro de niveles bajos del Caribe y su intercambio energético con las ondas del este, la reproducción adecuada del inicio e intensidad de la precipitación asociada al Monzón de Norteamérica y su relación con la dinámica local como los sistemas convectivos de mesoescala y la orografía.

REFERENCIAS

- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto, A. C. Conde, I. Quintanar, J. S. Santana, R. Romero, M. E. Maya, J. G. Rosario de la Cruz, Ma. del R. Ayala, H. Carrillo, O. Santiesteban y M. E. Bravo (2013), *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*, informe final del Proyecto al INECC, 150 pp. Disponible en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.htm>
- CRU (2012) <http://www.cru.uea.ac.uk>, revisada en agosto de 2012.
- Giorgi, F. y Mearns, L. (2001): *Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method*. Journal of Climate, Vol. 15, pp. 1141-1158.
- IPCC (2007): *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007*.
- Montero-Martínez, M.J. y J.L. Pérez López (2008): *Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie en aplicando el método REA para México, en Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*, Volumen II. Eds. P.F. Martínez Austria y A. Aguilar Chávez, 118 pp., IMTA, México, pp. 11-21.
- Moss, R.H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Vuuren, Carter, T.R., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. y Wilbancks, T.J., (2010): *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature, Vol. 463.

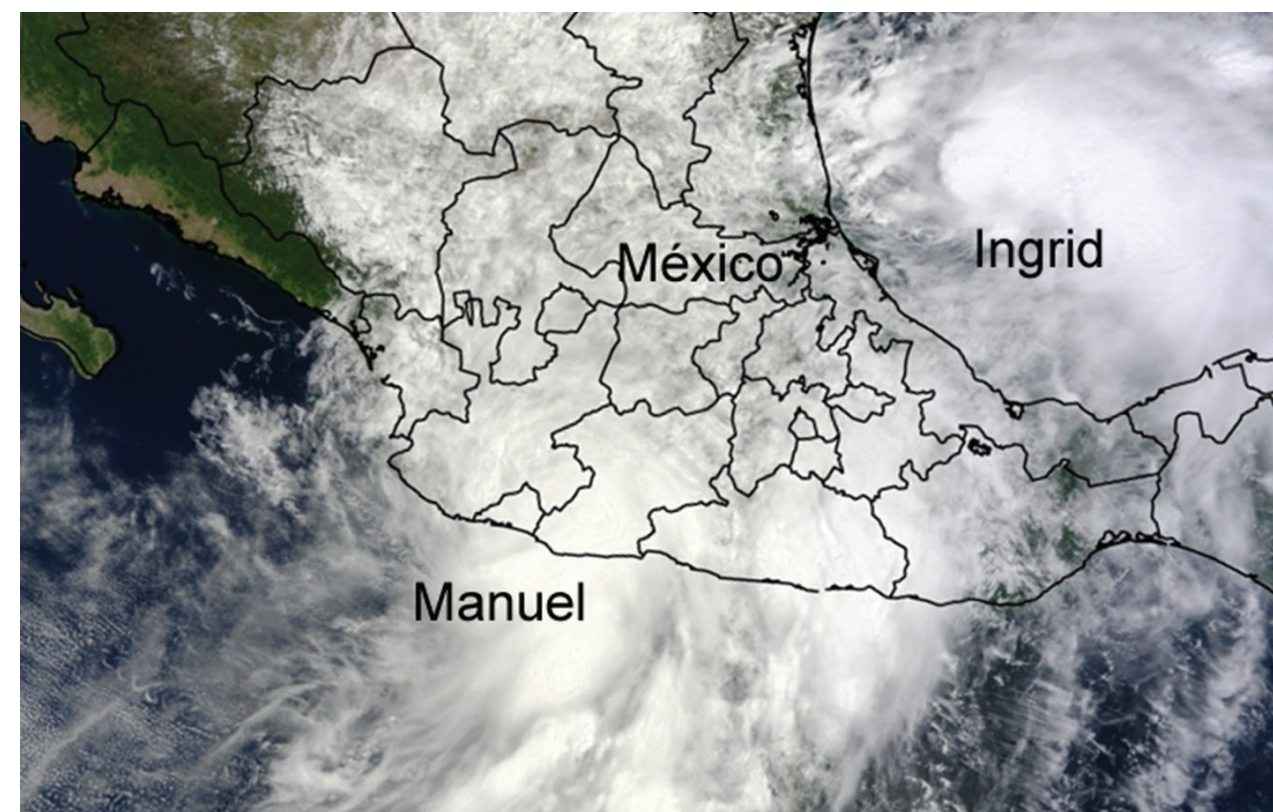




CAPÍTULO 3

RIESGO MUNICIPAL POR ÉPOCA DE LLUVIAS Y CICLONES TROPICALES EN MÉXICO Y PROYECCIONES BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Ricardo Prieto González, María Eugenia Maya Magaña,
José Guadalupe Rosario de la Cruz y Cécica Sánchez Medina





RESUMEN

En este capítulo se determina el riesgo actual de la época de lluvias y ciclones tropicales en el ámbito municipal, en los estados del país, y delegacional, en el Distrito Federal, como diagnóstico para desarrollar un manejo integral de prevención de desastres, realizando un análisis de los factores de amenaza y vulnerabilidad. Se presentan mapas que muestran los niveles de riesgo por época de lluvias y ciclones tropicales en escalas de “Muy alto”, “Alto”, “Moderado”, “Moderado bajo”, “Bajo” y “Muy bajo” riesgo. Los estados de Guerrero, Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Quintana Roo cuentan con municipios en “Muy alto” riesgo. Complementariamente, los estados con municipios en “Alto” riesgo son: Veracruz, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, San Luis Potosí, Hidalgo, Michoacán, Puebla, Yucatán, Nayarit y Quintana Roo.

A partir de la base de datos climatológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se determinó el valor del percentil 95 de lluvia diaria para los meses de mayo a noviembre de 1971 a 2010, como una medida de los eventos de precipitación extrema en el territorio mexicano.

Se calculó la anomalía del percentil 95 de lluvia diaria con cuatro modelos utilizados en el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en el escenario climático RCP8.5, comparando un periodo base (1971-2005) con un periodo futuro (2071-2100). Los resultados de este análisis muestran que cuatro de los modelos proyectan, para fines del siglo XXI, un incremento de las lluvias extremas en Aguascalientes, Tabasco, Zacatecas, sur de Veracruz y partes de Durango y San Luis Potosí; mientras, tres de los cuatro modelos, presentan un incremento en Chiapas, Guanajuato, Guerrero y Oaxaca.

Palabras clave: ciclones tropicales, lluvias, riesgo, cambio climático.

INTRODUCCIÓN

Debido a diversas condiciones sociales, económicas, climáticas y geológicas, los estados y municipios de México tienen distintos grados de riesgo ante el ingreso al país de ciclones tropicales (clasificados en: huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales), así como a las lluvias ocasionadas por otros sistemas meteorológicos, cuyos valores más extremos se alcanzan normalmente durante los meses de mayo a noviembre. Esta condición de riesgo se materializó durante varios días con la afectación simultánea producida por los ciclones *Ingrid* (océano Atlántico) y *Manuel* (océano Pacífico), en septiembre de 2013. Las lluvias ocasionadas por *Ingrid* y *Manuel* durante la semana del 13 al 19 de septiembre superaron los 1,000 mm de acumulación en el estado de Guerrero (mapa 3.1), así como acumulaciones superiores a 200 mm de lluvia en Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Veracruz, Hidalgo, Oaxaca, Michoacán, Colima, Jalisco, Sinaloa y Durango. Las lluvias extremas se sumaron a la condición de humedad del suelo, niveles medios a altos de los cuerpos de agua originados por la temporada de lluvias que inició en el mes de mayo previo, así como a la exposición y vulnerabilidad de la población e infraestructura.

Para reducir daños de futuros eventos meteorológicos que ocasionen lluvias extremas, se requiere encauzar labores de planeación, prevención y reducción de la vulnerabilidad de las distintas regiones del país, determinando el riesgo existente en las diversas entidades del país. Los mapas de riesgo son una herramienta útil para implementar medidas de mitigación antes de la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, lo cual es un dato importante para orientar esfuerzos a corto y mediano plazos (meses a años) con la finalidad de reducir pérdidas y daños.

En este trabajo se determinó el riesgo actual de la época de lluvias y ciclones tropicales en el ámbito municipal, en los estados del país, y delegacional, en el Distrito Federal (DF), como diagnóstico para el desarrollo de un manejo integral de prevención de desastres, y así procurar el menor daño posible en las comunidades vulnerables. Para conocer el riesgo es necesario calcular el peligro, la vulnerabilidad y evaluar el grado de exposición de la población.

El peligro o amenaza es la susceptibilidad que presenta un territorio ante un desastre; por tanto, este depende tanto de las características físico-geográficas y de la factibilidad que ocurra un evento de lluvias extremas.

Una definición operativa de la vulnerabilidad la ofrece el grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones sobre Vulnerabilidad y Riesgos (HVRI, por sus siglas en inglés), quienes la conciben como la susceptibilidad de una población, sistema o lugar dado para sufrir algún daño por exposición a una amenaza y que afecta directamente su capacidad de prepararse, responder y recuperarse de los desastres (Cutter et al., 2009). La vulnerabilidad social tiene que ver explícitamente con los factores demográficos y socioeconómicos que incrementan o atenúan los impactos de los eventos de peligro en las poblaciones locales; es decir, la vulnerabilidad social ayuda a definir quién está en riesgo y en qué grado puede verse perjudicado.

La exposición es proporcional a la población que puede verse afectada, obtenida por el censo que se realizó durante 2010, a través de la página de Internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (www.inegi.org.mx).

Una forma de estudiar en qué medida se puede ver modificado el peligro de la época de lluvias y ciclones tropicales, es considerar cómo los modelos climáticos proyectan el comportamiento de los valores extremos de lluvia diaria utilizando técnicas estadísticas, como el cálculo de la anomalía del percentil 95 de los eventos de lluvia.

OBJETIVO

Contar con un mapa que permita conocer los niveles de riesgo en el ámbito municipal, en los estados del país, y delegacional, en el Distrito Federal, para encauzar los esfuerzos de instituciones dedicadas a la atención de emergencias



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

y prevención desastres de manera anticipada, con el fin de mitigar el impacto de lluvias y ciclones tropicales. Asimismo, contar con estimaciones iniciales de las entidades de México en donde se proyectan incrementos de las lluvias extremas diarias ante escenarios de cambio de clima.

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE RIESGO MUNICIPAL

A partir de los valores numéricos del Peligro, Vulnerabilidad Social y Grado de Exposición, para cada municipio de los estados del país y delegación del Distrito Federal, se procedió a calcular el Riesgo a través de la operación siguiente:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Exposición}$$

Donde, el **Peligro** se definió como el promedio aritmético de: 1) El **índice de ingreso de ciclones tropicales** por estado y DF y, 2) El **índice de lluvia** en el ámbito municipal o delegacional:

$$\text{Peligro} = \frac{1}{2} [\text{Índice de ingreso de ciclones tropicales} + \text{Índice de lluvia}]$$

El **Índice de ingreso de ciclones tropicales** fue obtenido a partir de la base de datos de ciclones tropicales que han afectado a México durante el periodo 1971 a 2010, publicada por el SMN/Comisión Nacional del Agua, en su sitio de Internet (<http://smn.conagua.gob.mx>), la cual contiene las entidades federativas afectadas durante el ingreso o paso de ciclones tropicales, determinando el nombre y la categoría del ciclón durante el impacto, el lugar de entrada a tierra o costa más cercana, el periodo de afectación y el océano de origen del fenómeno.

Para generar el índice, las entidades federativas fueron ordenadas de acuerdo con el número de veces que fueron afectadas de 1971 a 2010, con el valor mayor al inicio y el menor al final. De ahí se definió un índice numérico con valor de 8 para los primeros cuatro lugares, con valor de 7 para los lugares cinco a ocho, y así sucesivamente, hasta el valor de 1 del lugar 29 al 32. Los valores resultantes de los índices tienen origen estrictamente cuantitativo (mapa 3.2-1); sin embargo, el resultado se debe considerar de modo cualitativo, donde lo importante es determinar el valor relativo del peligro de cada una de las entidades federativas.

Para el cálculo del **Índice de lluvia** se utilizó la base de datos de lluvia diaria del SMN/Comisión Nacional del Agua, para el periodo mayo-noviembre de 1971 a 2010, calculando la lluvia media diaria en mm/día para los estaciones reportadas utilizando una interpolación tipo Kriging (Oliver and Webster, 1990; mapa 3.2-2). Con ayuda de un Sistema de Información Geográfica se procedió a calcular la lluvia media diaria por municipio o delegación política (mapa 3.2-3). El valor de lluvia promedio diaria obtenido se ordenó de mayor a menor y se le asignó el valor numérico de 8 al 1, siguiendo un procedimiento equivalente al del índice anterior. El **Índice de lluvia** resultante se muestra en el mapa 3.2-4.

Al realizar el promedio de los índices de ingreso de ciclones tropicales y el índice de lluvia, se obtiene el valor del **Peligro por temporada de lluvias y ciclones tropicales**, el cual se muestra en el mapa 3.3. Los valores más altos (Índice = 7.5) del Peligro se encuentran en municipios de Guerrero, Veracruz y Tamaulipas; con valores también altos (Índice entre 6.5 y 7.0) en municipios de Campeche, Chiapas, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, San Luis Potosí y Sinaloa.

El **Índice de vulnerabilidad social** se define como una serie de factores económicos, sociales y culturales que determinan el grado en que un grupo social está capacitado para la atención de la emergencia, su rehabilitación y recuperación frente a un desastre (Kuroiwa, 2002), calculado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de México, en el ámbito municipal, y publicado en el sitio de Internet <http://www.atlascnacionalderiesgos.gob.mx/>. Este índice ha hecho uso de los datos del Censo de Población 2010. El mapa 3.4 muestra el **Índice de vulnerabilidad social** para cada municipio del territorio mexicano.

El **Grado de exposición** se considera directamente proporcional a la población total de cada municipio o delegación. Para obtener el índice de exposición se utilizó la información sobre el Censo de Población 2010 de la página de Internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (www.inegi.org.mx), en el ámbito municipal, contando con 2,456 municipios, los cuales se ordenaron de mayor a menor y divididos en bloques, de tal manera que se colocara el índice numérico con valor de 8 a 1. El valor de 8 corresponde al primer bloque de 307 municipios con mayor población, mientras que el valor 1 se encuentra en el bloque de los 307 municipios con menor población. A este valor se le denomina **Índice de exposición**; el resultado de este índice se muestra en el mapa 3.5.

Multiplicando los índices de peligro por los índices de vulnerabilidad y exposición, se obtienen los valores de **Riesgo** en un rango de 0.8 a 52.5, para los 2,456 municipios y delegaciones de la república mexicana, clasificados en: "Muy alto", "Alto", "Moderado", "Moderado bajo", "Bajo" y "Muy bajo" riesgo. El cuadro 3.1 muestra los valores y colores asignados de riesgo.

Cuadro 3.1. Valor numérico, valor nominal, color asignado y número de municipios en los diversos rangos de riesgo actual ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales.

Valor de Riesgo	Riesgo	Color asignado	Número de municipios
43.75 ≤ Riesgo	Muy alto	Rojo	18
35 ≤ Riesgo < 43.75	Alto	Naranja	76
26.25 ≤ Riesgo < 35	Moderado	Rosa	180
17.5 ≤ Riesgo < 26.25	Moderado bajo	Amarillo	404
8.75 ≤ Riesgo < 17.5	Bajo	Verde	803
0 ≤ Riesgo < 8.75	Muy bajo	Azul	975

RIESGO MUNICIPAL - ANÁLISIS DE RESULTADOS

El mapa 3.6 muestra el resultado del cálculo de riesgo municipal utilizando la metodología descrita en la sección anterior. Los estados que tienen municipios en "Muy alto" riesgo, con el número de municipios indicado entre paréntesis, son (cuadro 3.2): Guerrero (6), Chiapas (5), Veracruz (5), Oaxaca (1) y Quintana

Roo (1); siendo Veracruz y Quintana Roo afectados por ciclones del Atlántico y, en el caso de Chiapas y Oaxaca, por ciclones de ambos océanos; mientras que para Guerrero, por ciclones del océano Pacífico. Adicionalmente, los estados con municipios en "Alto" riesgo son: (cuadro 3.3): Veracruz (24), Chiapas (17), Guerrero (11), Oaxaca (7), San Luis Potosí (5), Hidalgo (3), Michoacán (3), Puebla (2), Yucatán (2), Nayarit (1) y Quintana Roo (1).

Cuadro 3.2. Municipios en "Muy alto" riesgo, ante la condición actual de lluvias y ciclones tropicales

Estado	Municipios en "Alto" riesgo	Número de municipios
Guerrero	San Luis Acatlán, Acatepec, Tlapa de Comonfort, Tlacoachistlahuaca, Xochistlahuaca, Coyuca de Benítez.	6
Chiapas	Chilón, Las Margaritas, Ocosingo, Tila, Chamula.	5
Veracruz	Zongolica, Tantoyuca, Ixhuatlán de Madero, Chicontepec, Tehuipango.	5
Oaxaca	San Miguel Soyaltepec.	1
Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto.	1

Cuadro 3.3. Municipios en "Alto" riesgo, ante la condición actual de lluvias y ciclones tropicales.

Estado	Municipios en "Muy alto" riesgo	Número de municipios
Veracruz	Tezonapa, Espinal, Rafael Delgado, Papantla, Tihuatlán, Altotonga, Coscomatepec, Jalacingo, Soledad Atzompa, Coxquihui, Filomeno Mata, Tequila, Zozocolco de Hidalgo, Coyutla, Ixhuatlán del Café, Soteapan, Coatzacoalcos, Córdoba, Cosoleacaque, Las Choapas, San Andrés Tuxtla, Benito Juárez, Llamatlán, Zontecomatlán de López y Fuentes.	24
Chiapas	Chenalhó, Oxchuc, Palenque, Huitiupán, Pantelhó, Pueblo Nuevo Solistahuacán, Sabanilla, Tumbalá, Teopisca, Zinacantán, Huehuetán, Salto de Agua, Simojovel, Suchiate, Yajalón, Huixtán, San Juan Cancuc.	17
Guerrero	Malinaltepec, Chilapa de Álvarez, Ajuchitlán del Progreso, General Heliodoro Castillo, Ometepec, Atlixac, Metlatónoc, Teloloapan, Tixtla de Guerrero, Olinalá, Zitlala.	11

Oaxaca	Santiago Juchitán, Huautla de Jiménez, San Felipe Jalapa de Díaz, San Juan Guichicovi, San Lucas Ojitlán, Santa María Chilchotla, San Agustín Loxicha.	7
San Luis Potosí	Aquismón, Tamazunchale, Axtla de Terrazas, Xilitla, Tancanhuitz.	5
Hidalgo	San Felipe Orizatlán, Tepehuacán de Guerrero, Huejutla de Reyes	3
Michoacán	Chilchota, Nahuatzen, Paracho.	3
Puebla	Cuetzalan del Progreso, Zacapoaxtla.	2
Yucatán	Chemax, Tizimín.	2
Nayarit	Del Nayar.	1
Quintana Roo	Felipe Carrillo Puerto.	1

El promedio aritmético estatal de los índices de riesgo se muestra en el cuadro 3.4. Los estados que encabezan este promedio son: Guerrero, Quintana Roo, Chiapas y Veracruz, todos ellos con índice de riesgo promedio que supera el valor de 24. Para un análisis más detallado, se muestran los mapas de riesgo de estos estados a una mayor escala en el mapa 3.7. Los estados con el menor valor medio de riesgo y donde todos los municipios se encuentran en condición de “Muy bajo” riesgo son: Zacatecas, Coahuila y Aguascalientes.

Cuadro 3.4. Promedio aritmético por estado, del valor de riesgo municipal.

Número	Estado	Promedio estatal
1	Guerrero	26.85
2	Quintana Roo	26.73
3	Chiapas	24.50
4	Veracruz	24.40
5	Michoacán	19.69
6	Sinaloa	18.85
7	Campeche	18.64
8	Tabasco	16.22
9	San Luis Potosí	15.94

10	Nayarit	15.57
11	Jalisco	14.91
12	Colima	13.56
13	Distrito Federal	13.50
14	Tamaulipas	13.11
15	Hidalgo	13.10
16	Yucatán	12.48
17	Estado de México	11.42
18	Puebla	11.41
19	Morelos	10.82
20	Oaxaca	9.54
21	Baja California Sur	8.82
22	Querétaro	8.18
23	Durango	8.13
24	Nuevo León	7.48
25	Baja California	7.04
26	Guanajuato	6.24
27	Tlaxcala	5.62
28	Sonora	5.55
29	Chihuahua	5.47
30	Zacatecas	4.40
31	Coahuila	4.13
32	Aguascalientes	3.75

Los índices de riesgo calculados en esta sección toman en cuenta la condición climática actual, la cual no es permanente debido al fenómeno de calentamiento global por la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero. Un modo de estimar los estados donde se incrementaría este riesgo, es calcular las proyecciones del incremento de eventos extremos de lluvia durante los meses de mayo a noviembre bajo un escenario de cambio climático, lo cual se presenta a continuación.

¿POR QUÉ SE ESPERA UN INCREMENTO DE EVENTOS EXTREMOS DE LLUVIA CON EL CAMBIO CLIMÁTICO?

El Grupo de Trabajo I del Panel, en su Contribución al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), concluye que:

Desde 1950, aproximadamente, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, también que es probable que existan más regiones en las que haya aumentado el número de sucesos de precipitaciones intensas que en las que haya disminuido, y es probable que la frecuencia o intensidad de las precipitaciones intensas haya aumentado en América del Norte y Europa. En otros continentes existe, como máximo, un nivel de confianza medio en los cambios ocurridos relativos a los sucesos de precipitaciones intensas.

Pero, ¿cuáles son los motivos que hay para que estos incrementos de lluvia extrema se esperen? El clima es un sistema complejo y para su estudio se requiere definir las leyes físicas que gobiernan los procesos que lo componen. Algunos de los procesos físicos que intervienen de modo importante en la determinación de la intensidad y distribución de eventos extremos son los siguientes:

1. La cantidad de vapor de agua (medida como la presión de saturación del vapor de agua) que una masa de aire en reposo puede mantener, se incrementa con un incremento de temperatura (Goff y Gratch, 1946).
2. El vapor de agua que hay en la atmósfera es un gas de efecto invernadero, por lo que existe un mecanismo de retroalimentación positivo (Dessler *et al.*, 2008): a un incremento de temperatura debido al incremento de concentraciones de CO₂, se tiene un incremento de vapor de agua en la atmósfera, que a su vez contribuye a incrementar la temperatura.
3. El incremento de temperatura debido al calentamiento global es una manifestación del incremento de energía térmica en la atmósfera. Otras formas de energía dentro del sistema climático son: vientos (energía cinética), derretimiento de nieve y hielo para formar agua líquida (energía de calor latente de fusión), evaporación de agua líquida para incrementar el vapor de agua en la atmósfera (energía de calor latente de evaporación) y la condensación del vapor de agua para formar gotas de agua líquida en las nubes que caen a la superficie en forma de lluvia (calor latente de condensación). Dentro del sistema climático hay una transferencia continua de la energía térmica a energía cinética y viceversa. Cuando hay un incremento global de temperatura, repercute directa o indirectamente en los sistemas atmosféricos de viento y de lluvia que forman nuestro clima.

Estos procesos son sólo una muestra de los que intervienen para definir el clima. Son conocidos como “procesos no-lineales”, lo que significa una dificultad para definir una relación directa causa-efecto de largo plazo entre las diversas variables y su distribución espacial y temporal. Por ello se utilizan modelos climáticos para estudiar los efectos del incremento de gases de efecto invernadero. Para

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Cuadro 3.5. Modelos utilizados para estudiar las proyecciones en anomalía de lluvias extremas para el periodo 2071-2100.

Modelo	Institución/país	Espaciamiento entre nodos
CNRM-CM5	Centro Nacional de Investigación Meteorológica/ Francia; Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Cálculo Científico	1.406° en longitud 1.401° en latitud
MIROC5	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio)- Instituto Japonés de Estudios Ambientales-Agencia Japonesa para Ciencia y Tecnología Marina y Terrestre/Japón	1.406° en longitud 1.401° en latitud
MPI-ESM-LR	Instituto Max Planck para Meteorología/Alemania	1.875° en longitud 1.865° en latitud
MRI-CGCM3	Instituto Meteorológico de Investigación/Japón	1.125° en longitud 1.121° en latitud

la identificación de las proyecciones de cambio en lluvias extremas en el periodo 2071-2100, que se realizan en esta sección, se utilizaron cuatro modelos climáticos (cuadro 3.5), definiendo el periodo 1971-2005 como periodo “base” y utilizando sus proyecciones futuras al periodo 2071-2100.

IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS PARA LA CLIMATOLOGÍA ACTUAL Y ANTE PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para la identificación de eventos extremos de lluvia diaria se utilizan, comúnmente, técnicas estadísticas. Una de las técnicas más usadas divide la lluvia diaria en percentiles. Estos percentiles son definidos como el valor de lluvia (en un año promedio) que no excede cierto porcentaje; por ejemplo, el percentil 95 de los eventos con lluvia es definido como la medida de precipitación acumulada en 24 horas, para un periodo definido, donde el 95% de los valores no excede dicha precipitación. Para definición de valores extremos se utilizan, de forma común, los percentiles 90 o 95. En este trabajo usaremos el percentil 95.

A partir de la base de datos climatológica del SMN, se determinó el valor del percentil 95 de lluvia para los meses de mayo a noviembre en el periodo 1971-2010, el cual se muestra en el mapa 3.8. Como se observa en este mapa, los valores más altos de lluvias del percentil 95 de mayo a noviembre se presentan de manera normal en zonas costeras o montañosas de Baja California Sur, Nayarit, San Luis Potosí, Veracruz, Oaxaca y Chiapas. Estos valores extremos de lluvia están asociados, de modo muy frecuente, al ingreso de ciclones tropicales a estas regiones del país.

Este mismo cálculo se realizó para las bases de datos de los cuatro modelos mostrados en el cuadro 3.5, los cuales forman parte del ensamble multimodelo CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012), utilizado en el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. El escenario escogido es el más extremo, denominado “RCP8.5” (Moss *et al.*, 2010), comparando el periodo

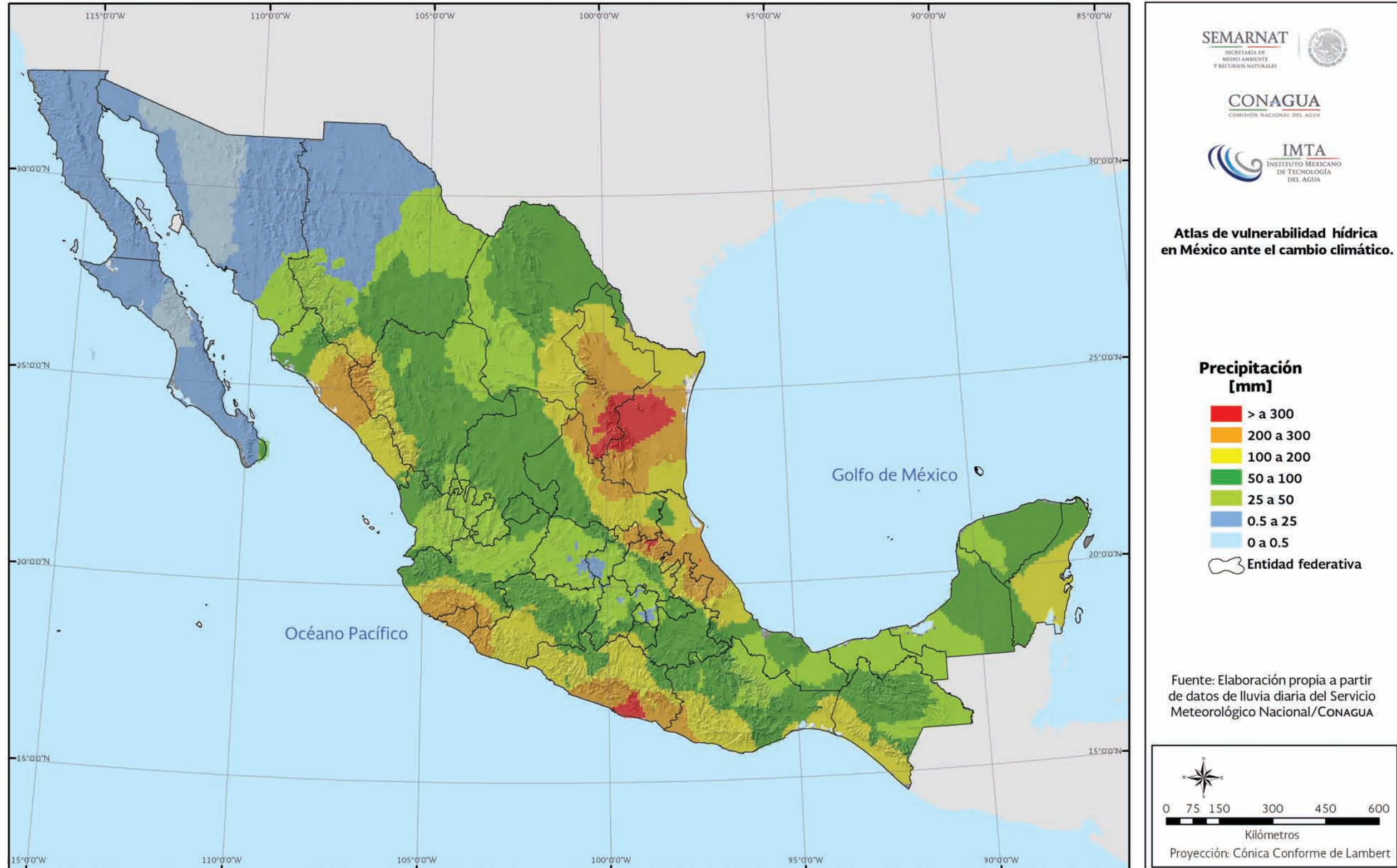
2071-2100 con el periodo base 1971-2005 mediante el cálculo de la anomalía del percentil 95 de la lluvia diaria respecto al periodo histórico de cada uno de los cuatro modelos, ubicando las zonas donde cada modelo simula un incremento o decremento de las lluvias extremas (percentil 95).

Los resultados se presentan en el mapa 3.9, donde se observa que los cuatro modelos presentan un incremento de las lluvias extremas en Aguascalientes, Tabasco, Zacatecas, sur de Veracruz y partes de Durango y San Luis Potosí. Tres de los cuatro modelos presentan un incremento en Chiapas, Guanajuato, Guerrero, y Oaxaca. En Quintana Roo y la parte centro y norte de Veracruz hay dos modelos que presentan incremento y dos que presentan decremento de lluvias extremas. Al efectuar la media aritmética de los cuatro mapas 3.9, se encuentra que el mayor incremento proyectado de las lluvias extremas para el periodo 2071-2100 está en los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero.



PRECIPITACIÓN SEMANAL 13 AL 19 DE SEPTIEMBRE 2013

Mapa 3.1



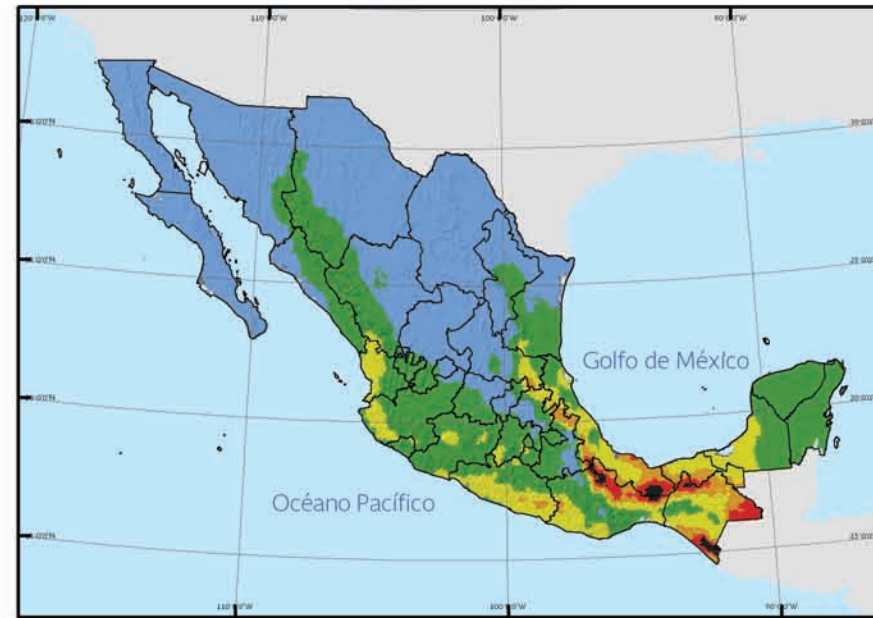
ELEMENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE DE PELIGRO

Mapa 3.2

1. Índice estatal de peligro por ingreso de ciclones



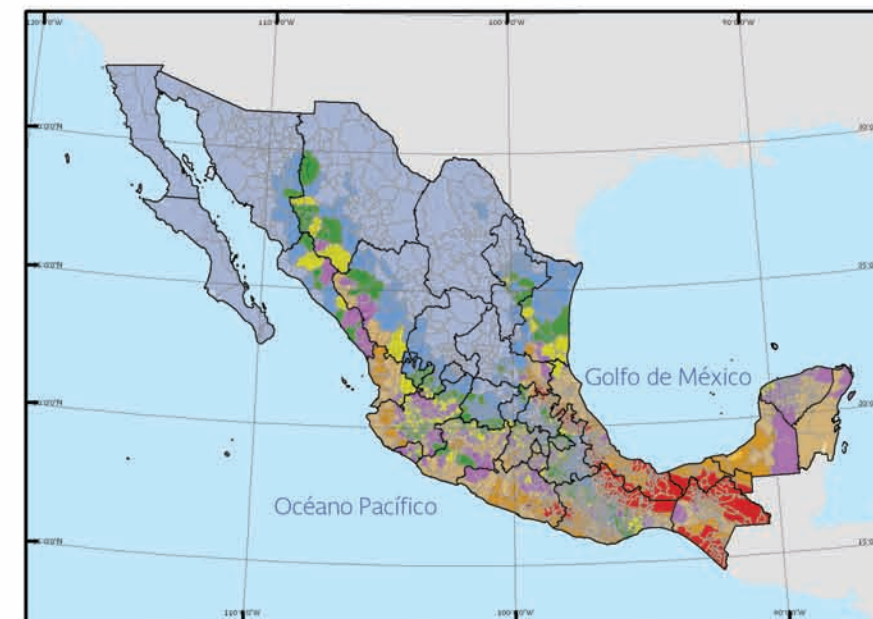
2. Lluvia media de May-Nov de 1971 a 2010



3. Lluvia municipal May-Nov de 1971 a 2010

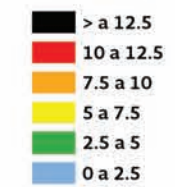


4. Índice municipal de peligro por lluvias



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Lluvia 2 y 3 [mm/día]



Índices 1 y 4



Entidad federativa
Municipios

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servicio Meteorológico Nacional/CONAGUA



0 250 500 1,000 1,500

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ÍNDICE DE PELIGRO POR LLUVIAS Y CICLONES TROPICALES

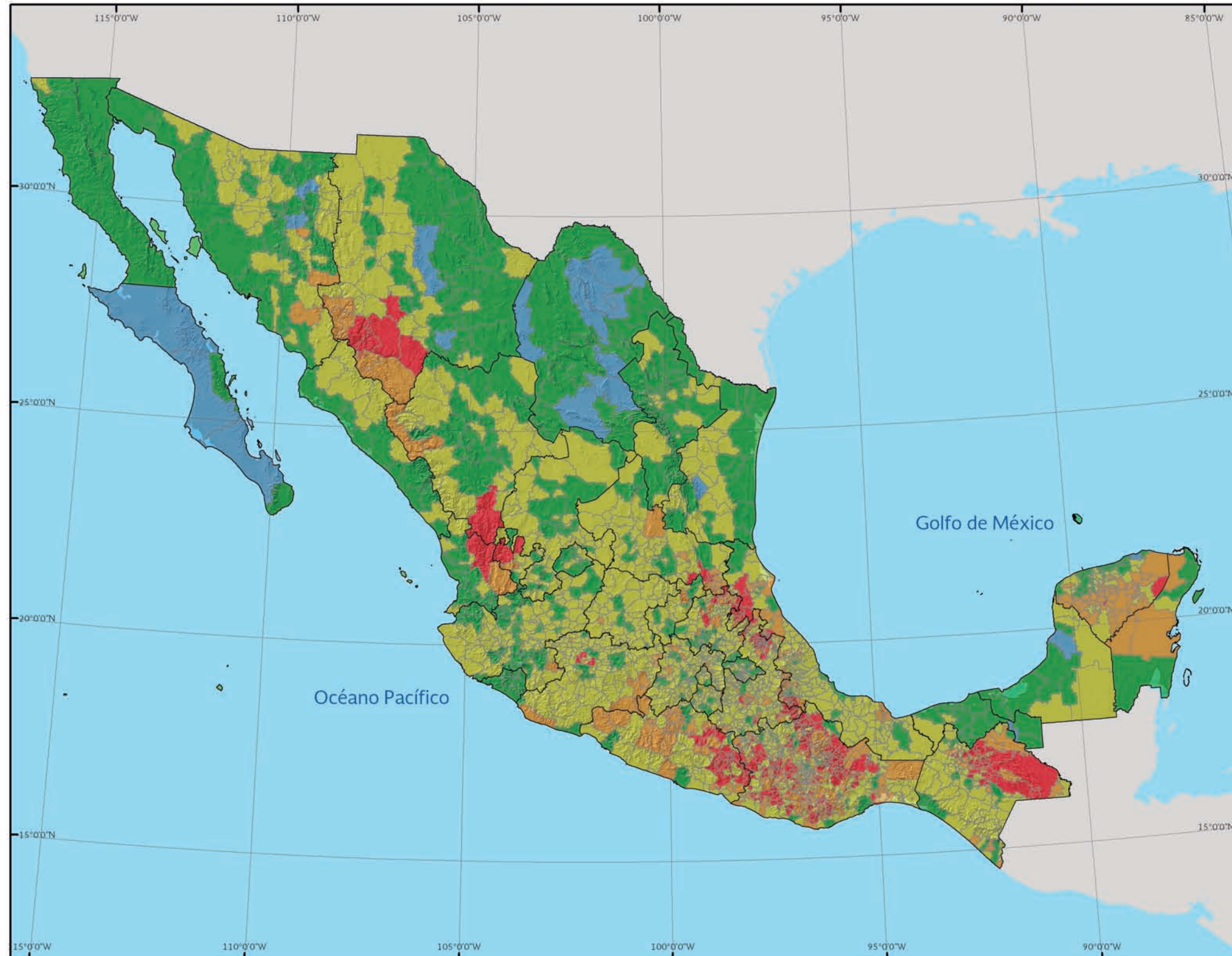
Mapa 3.3



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

VULNERABILIDAD MUNICIPAL (CENAPRED)

Mapa 3.4



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Vulnerabilidad

- Muy Alta
- Alta
- Media
- Baja
- Muy Baja

- Entidad federativa
- Municipios

Fuente: Elaboración propia a partir de datos publicados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres.



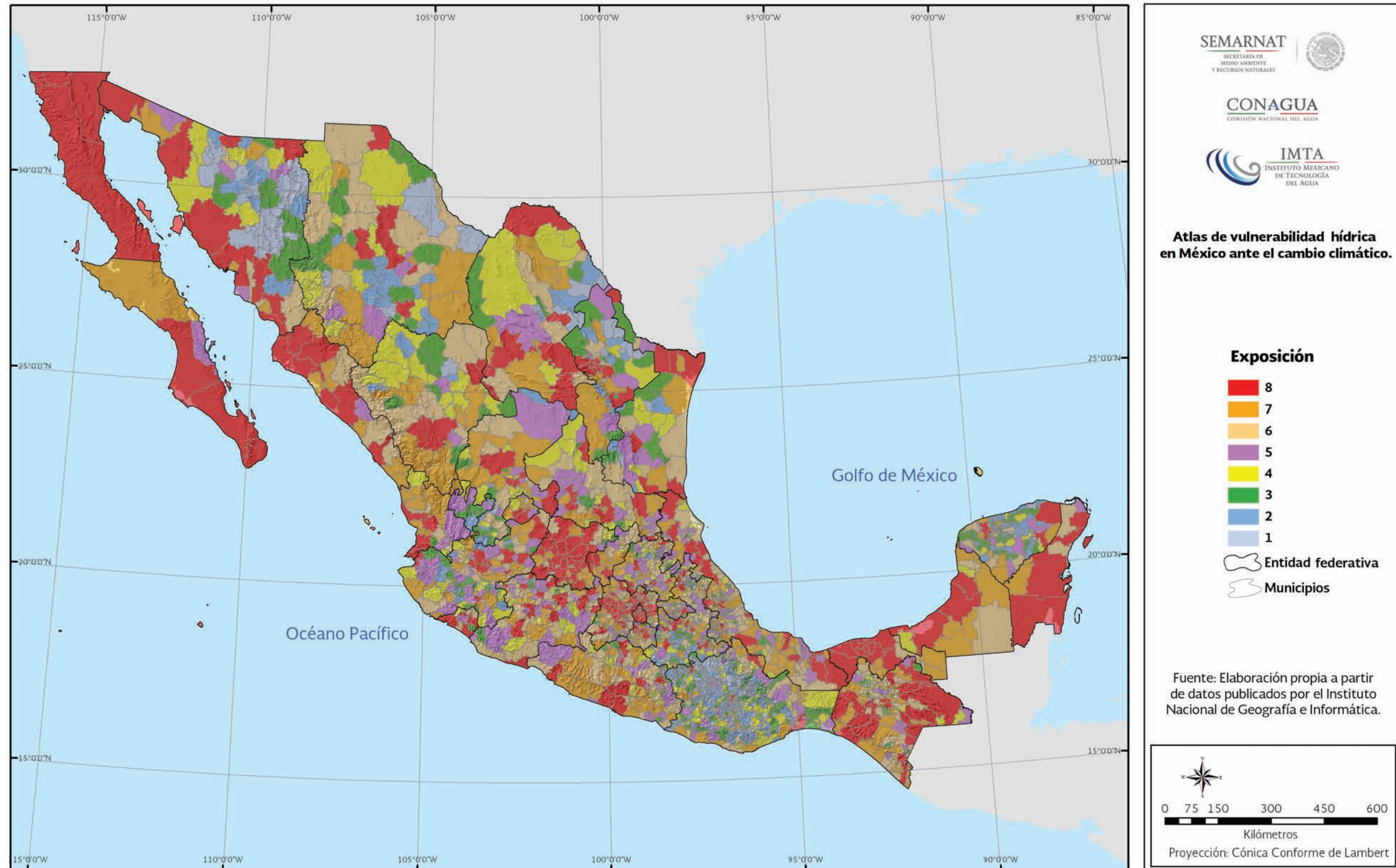
0 75 150 300 450 600

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

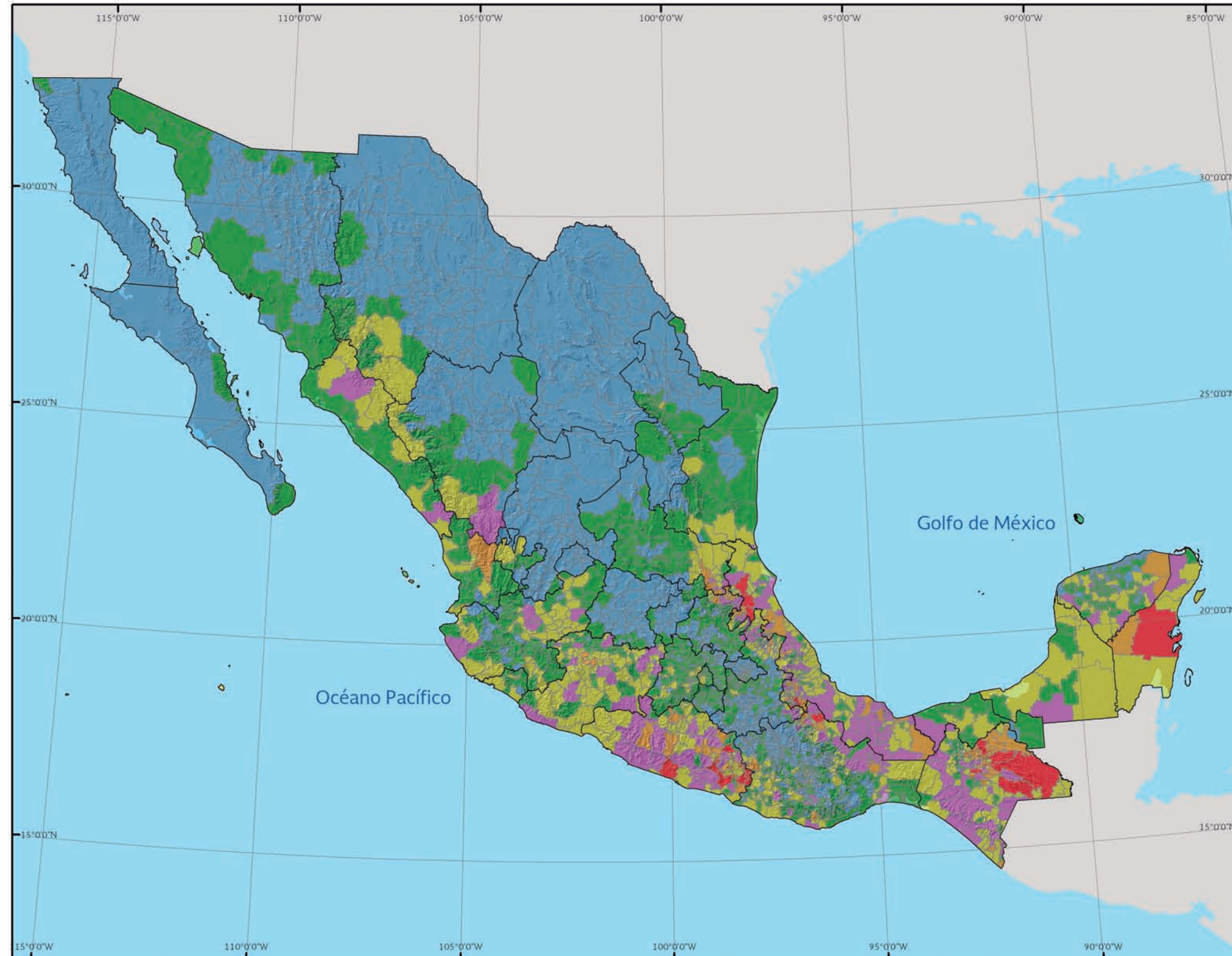
GRADO DE EXPOSICIÓN

Mapa 3.5



RIESGO MUNICIPAL POR LLUVIAS Y CICLONES TROPICALES

Mapa 3.6



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Riesgo

- Muy Alto
- Alto
- Moderado
- Moderado Bajo
- Bajo
- Muy Bajo
- Entidad federativa
- Municipios

Fuente: Elaboración propia. Cálculo por municipio o delegación considerando su vulnerabilidad social, la precipitación de mayo a noviembre y el ingreso de ciclones tropicales. Período: 1971-2010



0 75 150 300 450 600

Kilómetros

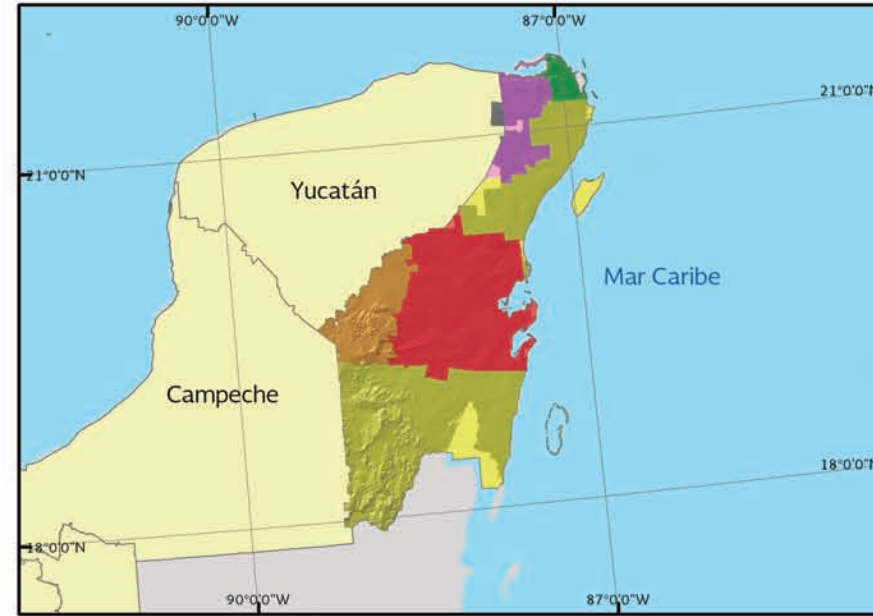
Proyección: Cónica Conforme de Lambert

RIESGO POR LLUVIAS Y CICLONES Mapa 3.7

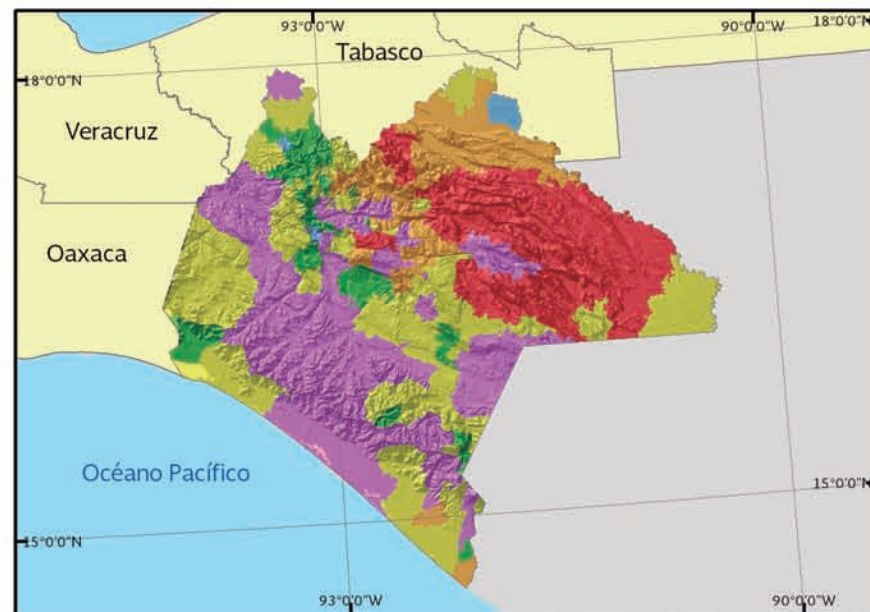
1. Guerrero



2. Quintana Roo



3. Chiapas



4. Veracruz



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Riesgo

- Muy Alto
- Alto
- Moderado
- Moderado Bajo
- Bajo
- Muy Bajo
- Entidad federativa
- Municipios

Fuente: Elaboración propia. Cálculo por municipio considerando su vulnerabilidad social, la precipitación de mayo a noviembre y el ingreso de ciclones tropicales.
Periodo: 1971-2010



0 50 100 200 300

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

PERCENTIL 95 DE LLUVIA MAY-NOV (1971-2010)

Mapa 3.8



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Percentil 95 [mm]

- > a 75
- 60 a 75
- 45 a 60
- 30 a 45
- 15 a 30
- 1 a 15

Entidad federativa

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de lluvia diaria del Servicio Meteorológico Nacional/CONAGUA



0 75 150 300 450 600

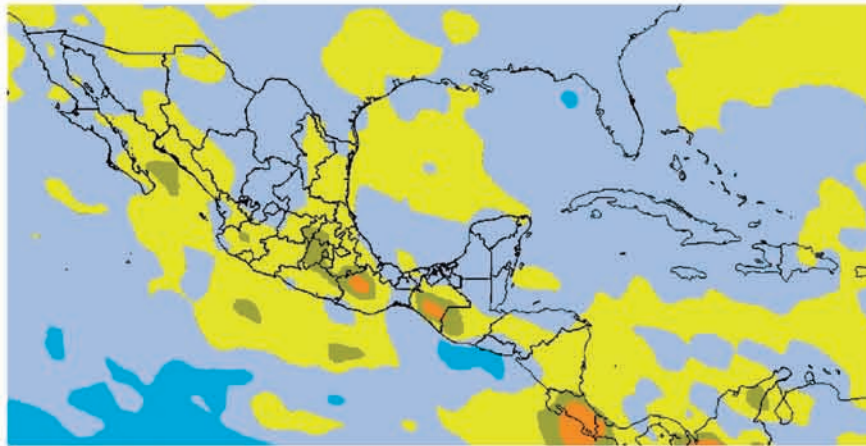
Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

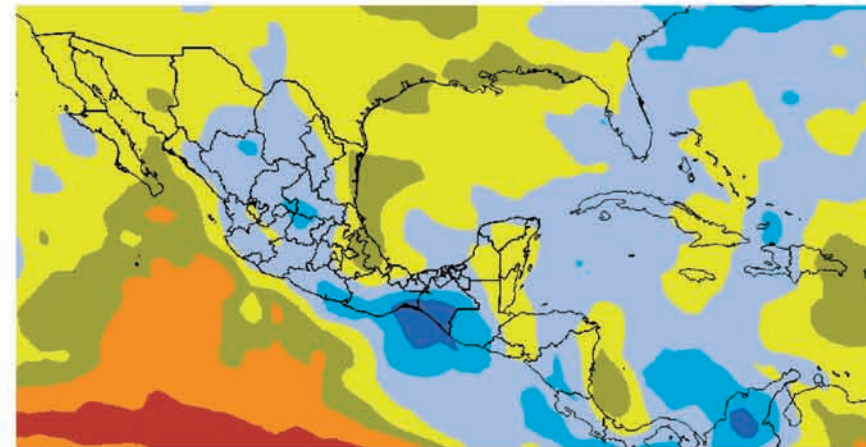
ANOMALÍAS DEL PERCENTIL 95 DE LLUVIA

Mapa 3.9

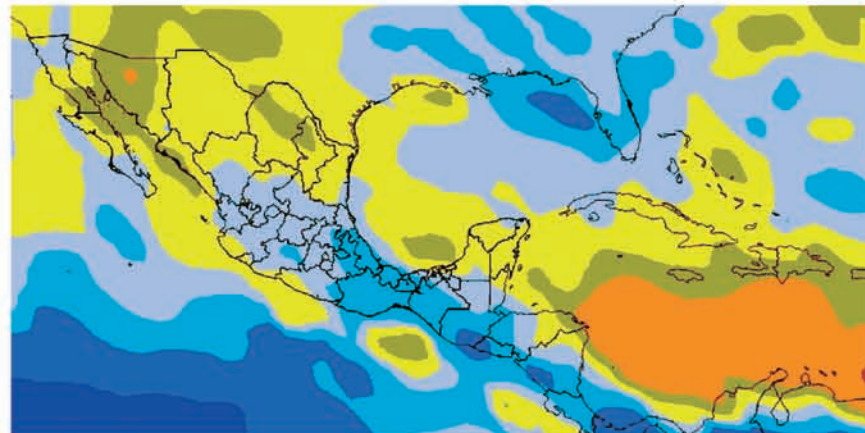
a) Modelo CNRM



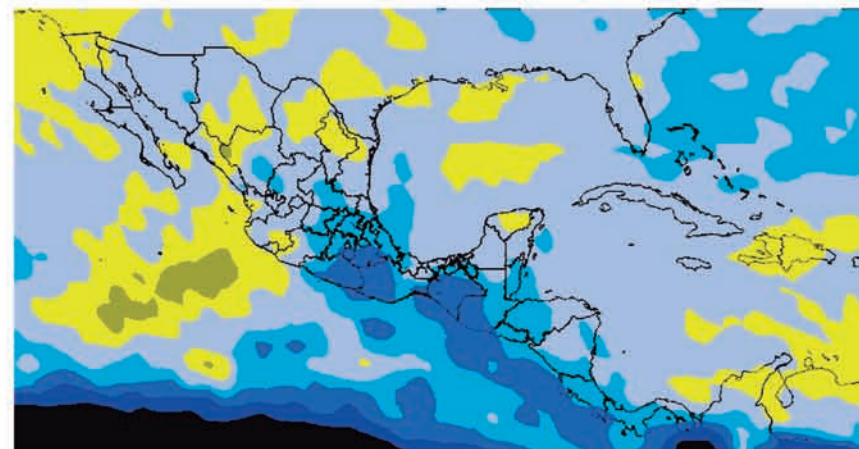
b) Modelo MIROC



c) Modelo MPI

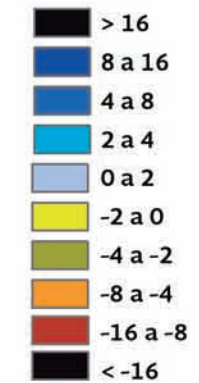


d) Modelo MRI



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Anomalia [mm]



Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de lluvia diaria del ensamble multimodelo CMIP5 para el escenario climático RCP8.5. Mayo-Noviembre 2071-2100 para cuatro modelos del IPCC.



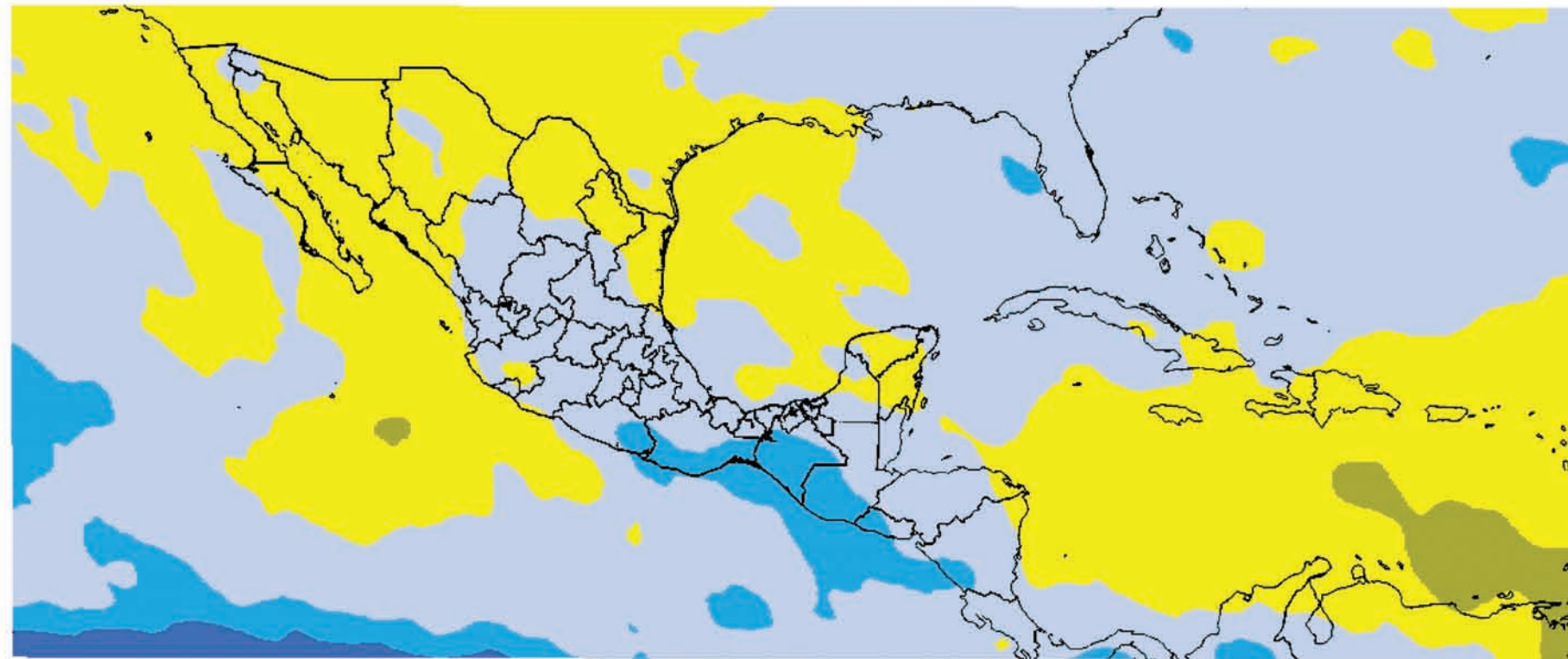
0 250 500 1,000

kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ANOMALÍAS DEL PROMEDIO DEL PERCENTIL 95 DE LLUVIA

Mapa 3.10



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Anomalía [mm]

- 4 a 8
- 2 a 4
- 0 a 2
- 2 a 0
- 4 a -2

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos de lluvia diaria del ensamble multimodelo CMIP5 para el escenario climático RCP8.5. Mayo-Noviembre 2071-2100 promedio cuatro modelos del IPCC.



0 250 500 1,000

kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

CONCLUSIONES

Los mapas de riesgo son una herramienta útil para implementar medidas de mitigación antes de la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. En este capítulo, se calcula el riesgo para los municipios y delegaciones de la república mexicana, lo cual es un dato importante para la orientación de esfuerzos a corto y mediano plazos (meses a años) para la reducción de pérdidas y daños.

Se observó que los estados que tienen municipios con “Muy alto” riesgo son Veracruz, Quintana Roo, Chiapas, Guerrero y Oaxaca, siendo los dos primeros afectados por ciclones del Atlántico; en el caso de Chiapas y Oaxaca, por ciclones de ambos océanos; mientras que para Guerrero por ciclones del océano Pacífico. Adicionalmente, Yucatán, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Michoacán y Nayarit, son estados que tienen municipios en “Alto” riesgo.

En tres de los cuatro estados con el mayor riesgo estatal promedio (Guerrero, Chiapas y Veracruz), las proyecciones de tres de los cuatro modelos climáticos estudiados tienen un incremento de lluvias extremas, lo cual nos indica que los esfuerzos que se realicen en estas entidades para la reducción de la vulnerabilidad serían reconocidos como una labor importante en el corto, mediano y largo plazos.

Para reducir los riesgos ante la época de lluvias y ciclones tropicales, se sugiere implementar medidas de prevención y mitigación como las siguientes:

- Mejorar los pronósticos meteorológicos de corto y mediano plazos, optimizando la asimilación de observaciones para la generación de condiciones iniciales, corrigiendo los errores sistemáticos de los modelos, ejecutando y validando los pronósticos en modo ensamble multimodelo.
- Implementación de sistemas de alerta temprana desagregados desde los ámbitos federal hasta el municipal, desarrollando herramientas informáticas que faciliten la toma de decisiones.
- Uso generalizado de esquemas financieros de administración de riesgo.
- Elaboración de planes de respuesta a emergencia con responsabilidades detalladas, claras y eficientes.
- Optimizar la planeación del uso del suelo para su aprovechamiento habitacional, agrícola, ganadero e industrial.
- Mejoramiento de los pronósticos estacionales del clima y uso de los mismos para planificación de actividades a mediano plazo.

Una necesidad apremiante para la disminución de afectaciones es la creación de mapas de riesgo dinámicos, elaborados en tiempo real y utilizando estimaciones o pronósticos de las lluvias que traerán fenómenos meteorológicos extremos en el corto plazo (de uno a 14 días). Estos mapas deben ser obligadamente complementados con la ejecución de acciones de mitigación claras, oportunas y eficientes, privilegiando la reducción de pérdidas humanas.

Como posibilidad de trabajo a futuro, se sugiere extender los estudios de evaluación de riesgo ante lluvias y ciclones tropicales considerando los aspectos siguientes:

- a) Incorporar nuevas componentes para el cálculo de la vulnerabilidad y el peligro. Entre los más importantes sobresalen los aspectos hidrológicos; por ejemplo, definir la parte de la población que se encuentra asentada en zonas inundables, incluyendo también una estimación de zonas que sean susceptibles de deslaves o desgajamientos.
- b) Realizar estimaciones detalladas de las condiciones socioeconómicas futuras que ayuden a determinar la vulnerabilidad de la población ante los distintos peligros asociados al cambio climático.

- c) Desarrollar estudios sistemáticos de los resultados de los modelos de clima y sus proyecciones para las décadas futuras, incorporando los elementos de variabilidad y cambio climático al desarrollo de las actividades humanas; particularmente preparándose en aquellos lugares que tengan una tendencia al incremento de lluvias extremas.

REFERENCIAS

- Cutter, S.L., C.T. Emrich, J.J. Webb y D. Morath (2009). *Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the literature*. Final report to Oxfam America. Hazard and Vulnerability Research Institute University of South Carolina.
- Dessler, A. E., Z. Zhang y P. Yang (2008). Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20704, doi: 10.1029/2008GL035333.
- Goff, J. A. y S. Gratch (1946). Low-pressure properties of water from –160 to 212 °F, in *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, pp 95–122, presented at the 52nd annual meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, New York, 1946.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, 27 pp.
- Kuroiwa, J. (2002). *Reducción de desastres: viviendo en armonía con la naturaleza*. Editorial CISMID, 429 pp.
- Moss, R.H., J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith, R.J. Stouffer, A.M. Thomson, J.P. Weyant y T.J. Wilbanks (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 463(7282):747–56.
- Oliver, M.A. y R. Webster (1990). “Kriging: a method of interpolation for geographical information system”, *INT. J. Geographical Information Systems*, Vol. 4, No. 3, 313–332.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Meteorológico Nacional/Comisión Nacional del Agua, por facilitar la base de datos climatológica de lluvias diarias necesaria para la realización de los mapas 1.2, 2.2 y 8, así como de los cálculos derivados de estos mapas.

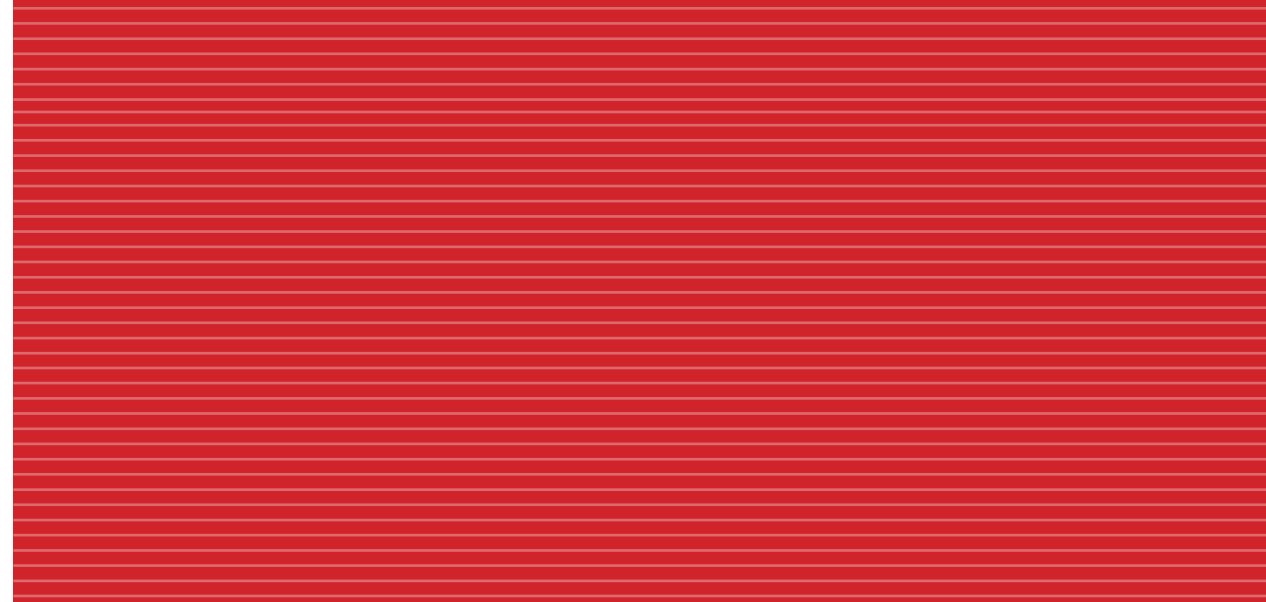
Al M. en I. Víctor Javier Bourguett Ortiz, Director General del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; al Mtro. José Raúl Saavedra Horita, Coordinador de Hidrología, y a la M. en C. Olivia Rodríguez López, Subcoordinadora de Hidrometeorología de ese mismo Instituto, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Al Grupo de Trabajo en Modelación Acoplada del Programa Mundial para Investigación del Clima, responsable del CMIP, así como a los grupos de trabajo listados en el cuadro 3.5 de este capítulo, por la producción y disponibilidad de los resultados numéricos.

El Programa para Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América provee un soporte coordinado y desarrollo de *software*, en cooperación con los Portales de la Organización Global para la Ciencia del Sistema Terrestre.

Al Ing. Cervando Castillo Romano, por su apoyo en la realización de los mapas.





CAPÍTULO 4

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RECURSO HÍDRICO DE MÉXICO (AGUA SUPERFICIAL)

Iván Rivas Acosta





RESUMEN

De acuerdo con el Quinto Reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se espera que el cambio climático modifique el ciclo hidrológico y por lo tanto la disponibilidad del recurso hídrico. Los resultados de los Modelos de Circulación Global (MCG) indican que la precipitación anual será menor, con lo cual es de esperarse que el escurrimiento medio anual también disminuya. Dado el crecimiento poblacional natural, es previsible que la disponibilidad media anual de agua por habitante sea menor. En México las regiones áridas y semiáridas son especialmente vulnerables. El presente estudio tiene por objeto identificar las zonas de la república mexicana en donde las estrategias de adaptación para reducir la vulnerabilidad serán más necesarias.

Tomando como base el ensamble ponderado de 14 MCG y la definición de vulnerabilidad del IPCC, se estimaron las áreas más sensibles ante un escenario en el cual la precipitación anual disminuya. De acuerdo con el análisis, las cuatro regiones más críticas son el Norte de Sinaloa, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, la Cuenca del Río Conchos y la parte Norte de la Cuenca Lerma-Chapala, en donde se ubican las ciudades de Querétaro y León. Sin embargo, otras regiones altamente sensibles son la Zona Metropolitana de Monterrey, el centro de Sinaloa y el Noroeste de Sonora. En estas regiones será necesario aumentar el grado de resiliencia, es decir, la capacidad para afrontar condiciones adversas ante un decremento en el escurrimiento y con ello lograr adaptarse satisfactoriamente. Finalmente, resulta de vital importancia garantizar que las propuestas de adaptación sean ambientalmente sustentables y se respeten ciertas normas, tales como la protección del gasto ecológico en los ríos y se evite la sobreexplotación de los acuíferos.

INTRODUCCIÓN

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CICLO HIDROLÓGICO

De acuerdo con los resultados generales de los modelos climáticos globales que participaron en los últimos dos reportes de IPCC, es previsible que conforme avance el proceso del cambio climático la precipitación anual sea menor, pero con mayor concentración. Es decir, un decremento en las láminas de precipitación anuales pero un incremento en la intensidad de las tormentas. Por lo tanto se espera que la disponibilidad media anual de agua por habitante disminuya. Además, la persistencia de prácticas agrícolas poco eficientes, la sobreexplotación de acuíferos y el tratamiento inadecuado del agua urbana e industrial, que deteriora la calidad del agua superficial y contamina los acuíferos, aumenta el grado de vulnerabilidad futura del recurso hídrico. Las regiones áridas y semiáridas de México son especialmente vulnerables (IMTA, 2010). El presente estudio tiene por objeto identificar las zonas de la república mexicana donde las estrategias de adaptación para reducir la vulnerabilidad en las zonas más sensibles serán más necesarias.

El análisis de los escenarios de cambio climático y proyecciones del clima es importante para obtener aproximaciones sobre las posibles condiciones climáticas y sus impactos en las próximas décadas. Los modelos climáticos manejan una mayor certidumbre sobre los patrones climáticos a nivel subcontinental (IPCC, 2007). Existen esfuerzos importantes por avanzar en la certeza de los modelos climáticos en el ámbito regional; sin embargo, el incremento de la resolución implica un aumento significativo en el grado de incertidumbre de las posibles variaciones en el ámbito local de precipitación y temperatura, y en especial, de las tendencias futuras sobre los eventos climáticos extremos (OECD, 2010; INECC, 2012).

En este capítulo se han integrado en el análisis los más recientes escenarios de cambio climático generados para México. Estos datos fueron compartidos por

la Red Mexicana de Modelación del Clima, que coordina el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), y que integran el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM).

ANTECEDENTES

Aunque los cambios esperados en el escurrimiento superficial debido al calentamiento global aún no han sido cuantificados en todo el país, Rivas y Montero (2013, 2014) utilizaron datos de 23 MCG. Empleando la NOM-011 (CNA, 2000) se calcularon dichos cambios en tres cuencas: río Conchos, río Lerma-Chapala y río Grijalva (hasta la presa Peñitas). Se utilizaron tres horizontes de estudio: 2030, 2050 y 2100. El cuadro 4.1 presenta los decrementos máximos esperados en el volumen de escurrimiento anual (%), con relación a datos históricos hasta el año 2009.

Cuadro 4.1. Decrementos máximos esperados (%) en escurrimiento superficial (Rivas y Montero, 2013; Rivas y Montero, 2014).

Horizonte	Cuenca		
	Río Conchos	Lerma-Chapala	Río Grijalva
2030	22	17	19
2050	25	21	13
2100	28	28	9



METODOLOGÍA

Para el presente estudio se tomaron datos de escenarios de cambio climático para México, utilizando el algoritmo REA, enunciados en el capítulo 2 de este libro. En términos generales, la vulnerabilidad es el grado en el que un sistema es susceptible a efectos adversos. La vulnerabilidad está en función de tres factores (IPCC, 2007):

- Grado de exposición.
- Sensibilidad.
- Capacidad de adaptación.



Figura 4.1 Factores que determinan la vulnerabilidad (IPCC, 2007).

A continuación, se describe cada factor mostrado en la figura anterior y la manera como se interpretó para evaluar la vulnerabilidad ante el cambio climático.

GRADO DE EXPOSICIÓN

CAMBIO EN PRECIPITACIÓN ANUAL

En México existen grandes variaciones en el relieve que los MCG son incapaces de resolver. De esta manera, todos aquellos procesos de convección forzada que producen intensas precipitaciones están ausentes de la física explícita usada en estos modelos. Los resultados más recientes del REA para el CMIP5 muestran aumentos de temperatura, entre 1.5 y 5°C, de mediados a finales de siglo, bajo los escenarios de bajas (RCP4.5) y altas (RCP8.5) emisiones, respectivamente. En términos generales, se esperan reducciones de precipitación media anual en todo México, aunque la incertidumbre es muy alta. Por lo anterior, es probable que se presente una intensificación de las sequías de medio verano.

BRECHA HÍDRICA

Considerando la problemática actual del recurso hídrico y su trascendencia en el bienestar y desarrollo del país, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011) planteó la Agenda del Agua 2030, la cual postula una estrategia de mediano plazo, como resultado de la participación de la sociedad comprometida con la sustentabilidad hídrica. En ella se establecen cuatro ejes de política hídrica de sustentabilidad al mediano y largo plazos, definidas en el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2012:

- Cuencas y acuíferos en equilibrio.
- Ríos limpios.
- Cobertura universal de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- Asentamientos seguros frente a inundaciones catastróficas.

La Agenda del Agua 2030 forma parte del Sistema Nacional de Planeación Hídrica. Tiene como insumos las definiciones de política de desarrollo, las definiciones de política en materia de agua y los resultados de los análisis de carácter técnico. En el Sistema Nacional de Planeación Hídrica se establece un conjunto de actividades que se vinculan de manera ordenada, sistemática y alineada para definir los lineamientos y estrategias de mediano y largo plazos, así como una cartera de proyectos para lograr el uso sustentable del agua.

La CONAGUA (2010) definió el concepto de célula de planeación como el área geográfica formada por un conjunto de municipios que pertenecen a un solo estado, dentro de los límites de una subregión hidrológica, de tal manera que existen un total de 168 células en todo el territorio mexicano. El presente estudio tiene como objeto la identificación espacial y jerarquización de las células de planeación que padecen una mayor vulnerabilidad ante el cambio climático. El conocimiento de estas regiones permitirá saber en dónde resulta prioritario realizar esfuerzos de adaptación, tales como la construcción de infraestructura y la implementación de medidas. Dichos esfuerzos de adaptación ayudan a reducir la vulnerabilidad del sistema.

En 2010, la CONAGUA realizó un Análisis Técnico Prospectivo (ATP) con el que se determinaron los retos hídricos a superar al año 2030, y se priorizaron las alternativas de solución para superarlos en cada una de las 168 células de planeación en que se dividió el territorio nacional. Estos resultados definieron los lineamientos y criterios estratégicos que permiten el uso sustentable y abastecimiento seguro a los diferentes usuarios del agua, al menor costo posible con máximos beneficios.

Durante marzo de 2012, tomando como base los resultados del ATP, la Subdirección General de Programación de la CONAGUA presentó los Programas Hídricos Regionales Visión 2030 en las 13 regiones hidrológico-administrativas (PRH). En ellos, se establecen las estrategias de mediano y largo plazos para un uso sustentable del agua y abastecimiento seguro a los diferentes usuarios del agua. En seguida, se identificaron las acciones y proyectos para lograr la sustentabilidad hídrica, mismas que se integraron en un catálogo de proyectos para alcanzar la visión altamente deseable en cada uno de los ejes rectores de la Agenda del Agua 2030. Posteriormente, y con el marco de referencia de los PHR, se elaboraron los Programas de Acciones y Proyectos para la Sustentabilidad Hídrica Visión 2030 (PAPSHE) en los 32 estados de la república mexicana. Partiendo del ATP (CONAGUA, 2010), un componente del grado de exposición se interpreta como la relación entre la brecha hídrica al 2030 y la oferta sustentable; es decir:

$$\text{Grado de exposición} = \frac{\text{Demanda al 2030} - \text{Oferta sustentable}}{\text{Oferta sustentable}} = \frac{\text{Brecha hídrica al 2030}}{\text{Oferta sustentable}}$$

La relación entre la brecha hídrica con la oferta sustentable tiene por objeto cuantificar la dificultad que una célula de planeación tendría para satisfacer su demanda al 2030. Es decir, si dos células tienen la misma brecha, aquella con menor oferta sustentable tendría una mayor dificultad para satisfacer la demanda al 2030 y, por lo tanto, sería más vulnerable ante un escenario de decremento en escurrimiento superficial.

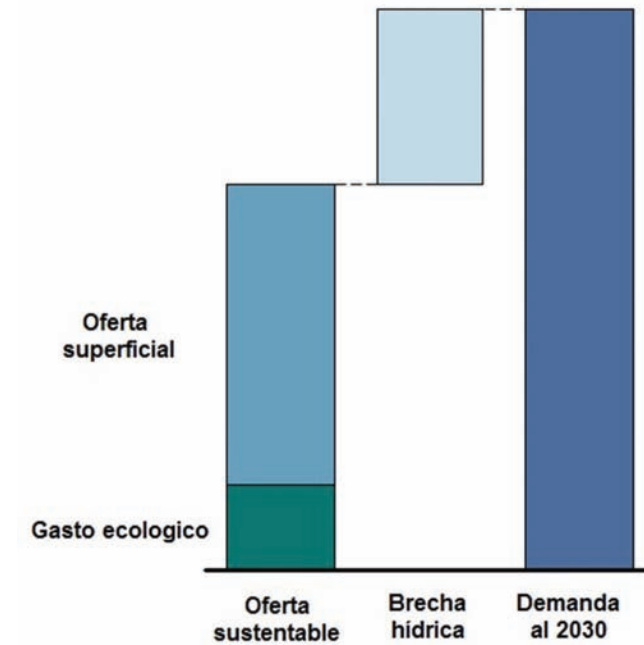


Figura 4.2 Brecha hídrica.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LAS SEQUÍAS

Por otra parte, dado el impacto adverso del cambio climático en las sequías, se analizó la frecuencia histórica de las sequías que reporta el Servicio Meteorológico Nacional a través del Monitor de Sequía de América del Norte (North American Drought Monitor), un esfuerzo de cooperación entre expertos de Canadá, México y Estados Unidos enfocado a monitorear la sequía en el sector de América del Norte (CONAGUA, 2012a).

SENSIBILIDAD

Este componente evalúa el grado de afectación ante el cambio climático. En otras palabras, la magnitud del daño en caso de una disminución en la precipitación. Este factor se interpreta como la cantidad de habitantes en los centros poblacionales: entre mayor sea el tamaño de población de una localidad, será más vulnerable ante la presencia de sequías. Para tal efecto, se utilizó el número de habitantes por municipio que se proyecta al año 2030, de acuerdo con las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010).

Partiendo de la hipótesis de que las regiones con mayor actividad comercial e industrial se ven seriamente afectadas ante las sequías, se tomó en cuenta el Producto Interno Bruto (PIB) nominal generado en las células de planeación para el año 2010 (INEGI, 2012). Dado que las actividades agrícolas se encuentran estrechamente relacionadas con la disponibilidad de agua, el tercer factor considerado fue el impacto económico en las actividades agrícolas en las células de planeación (CONAGUA, 2012b).

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

Este componente se refiere a la resiliencia de la región ante condiciones de aridez, es decir, al potencial de adaptarse al estrés impuesto por las sequías. Al ocurrir una reducción severa de la precipitación, o incluso bajo condiciones nulas de lluvia, se presentarían bajos niveles de escurrimiento y, por lo tanto, es de esperarse que las presas presenten bajos volúmenes de almacenamiento. Ante tal escenario, los acuíferos representarían la única fuente de suministro. En efecto, el agua subterránea proveniente de los acuíferos constituye una importante fuente de suministro para los centros poblacionales, zonas de riego y parques industriales.

CONAGUA (2009) clasificó el grado de explotación en los acuíferos nacionales bajo dos grandes categorías: subexplotados (donde la recarga natural por precipitación es mayor a la extracción) y sobreexplotados (donde sucede lo contrario). Centros poblacionales y áreas de riego ubicadas sobre acuíferos sobreexplotados tienen una vulnerabilidad mayor que aquellas localizadas sobre acuíferos subexplotados. Sin embargo, la metodología propuesta considera, de manera particular, el grado de sobreexplotación por célula de planeación (hm³).

El cuadro 4.2 resume los factores considerados para estimar la vulnerabilidad hídrica global.

Cuadro 4.2. Variables que integran la vulnerabilidad hídrica global.

Componente de vulnerabilidad	Variable	Significado	Fuente
Grado de exposición	Cambio en precipitación anual	Estimada a partir de datos de 15 Modelos de Circulación General (MCG)	IPCC-AR5 (2013)
	Brecha hídrica	Diferencia entre la oferta sustentable actual y la demanda al 2030	CONAGUA (2012b)
	Antecedentes históricos de las sequías	Identificación de las regiones más propensas a condiciones de aridez	Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
Sensibilidad	Población municipal al 2030	Cantidad de habitantes en un futuro cercano	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI (2010)
	Producto Interno Bruto (PIB)	Impacto en las actividades económicas regionales	INEGI (2012)
	Impacto en la agricultura	Afectación en el medio agrícola ante un decremento en precipitación	CONAGUA (2012b)
Capacidad de adaptación	Grado de explotación en los acuíferos	Grado de resiliencia ante condiciones de reducción en precipitación	CONAGUA (2012b)

ÍNDICE GLOBAL DE SEQUÍAS

Después de estimar los factores propuestos, y dado que se presentan con diferentes unidades, se hizo una normalización estándar de los mismos. Es decir, asignando un valor de 0.0 al mínimo y de 1.0 al valor máximo. Asumiendo factores de peso iguales para cada factor, se realizó una suma pesada de los factores analizados y, finalmente, se efectuó una normalización estándar de los valores resultantes. Dicho análisis permitió asignar un Índice Global de Vulnerabilidad por cambio climático en cada una de las 168 células de planeación, las cuales se clasificaron en cinco niveles de vulnerabilidad:

- “Muy alta”.
- “Alta”.
- “Media”.
- “Baja”.
- “Muy baja”.

RESULTADOS

Como resultado de la metodología propuesta, se obtiene la siguiente clasificación de vulnerabilidad en las células de planeación que se muestra en el cuadro 4.3. Las componentes de la vulnerabilidad se presentan en los mapas (4.1) y (4.2), mientras que la vulnerabilidad hídrica global se muestra en el mapa (4.3).

Cuadro 4.3. Niveles de vulnerabilidad en las células de planeación.

Nivel de vulnerabilidad	Células y/o número
Muy Alta	Valle de México _DF, Valle de México _Mex RFS_Sinaloa Norte _Sin Conchos _Chih Medio Lerma _Gto
Alta	Alto Santiago _Ags, Mexicali _BC Comondu _BCS, Monclova _Coah Coahuila Sureste _Coah, Acuña _Coah Alto Santiago _Jal, Tepalcatepec _Mich Monterrey _NL, Alto Balsas _Pue Medio Lerma _Qro, MQ_Sinaloa Centro _Sin Río Concepcion _Son
Media	27
Baja	44
Muy Baja	79

En esencia, se identifican cuatro regiones con “Muy alta” vulnerabilidad:

1) *Zona Metropolitana de la Ciudad de México* (células Valle de México _DF y Valle de México _Mex).

La concentración de población más grande del país representa la región más vulnerable dada la gran cantidad de habitantes, su importancia en la contribución al PIB nacional y la dificultad ambiental de solventar la demanda de agua al 2030.

2) *Norte de Sinaloa* (célula RFS_Sinaloa Norte _Sin)

Esta región presenta una precipitación media anual de aproximadamente 570 mm, menor al promedio nacional de 760 mm. Sin embargo, en esta célula se ubican algunos de los distritos de riego (DR) más productivos de México (DR 063 Guasave, 075 Río Fuerte y 076 Valle del Carrizo), con una superficie total del orden de 380,000 hectáreas. En caso de presentarse reducciones severas en precipitación, se originarían sequías en esta región que afectarían seriamente la producción de alimentos, cuyo efecto adverso se vería reflejado en la carencia de granos básicos en el resto de México.

3) *Cuenca del río Conchos* (célula Conchos _Chih)

La cuenca del río Conchos comprende aproximadamente 67,000 km² y es la más importante dentro de la Región Hidrológica-Administrativa VI Río Bravo. El

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

río Conchos es uno de los más importantes del norte de México y la principal corriente superficial del árido estado de Chihuahua. Con una precipitación media anual de 363 mm, esta región es propensa a frecuentes sequías que reducen periódicamente los niveles de las presas y, es por ello, que los acuíferos presentan un alto grado de explotación, principalmente en las zonas bajo riego. Debido al cambio climático, se estima que para el año 2030 los decrementos en los volúmenes de escurrimiento medio anual se reduzcan del orden del 20% (Rivas y Montero, 2013), con lo cual es de esperarse que aumente la frecuencia de las sequías. La ciudad de Chihuahua merece especial atención, dado que depende del agua subterránea para satisfacer el 92% de sus necesidades.

4) Región de El Bajío (célula Medio Lerma_Gto)

En esta región las principales ciudades (León, Guanajuato, Salamanca, Celaya y Querétaro) se ubican sobre acuíferos sobreexplotados. Con una precipitación media anual de 550 mm, los escurrimientos superficiales no han sido suficientes para satisfacer la demanda de agua de las crecientes actividades industriales y domésticas de este corredor industrial. Por ello, se han abatido los mantos freáticos. Por otra parte, las corrientes superficiales se encuentran altamente contaminadas por las descargas industriales.

Las cuatro regiones anteriores representan las áreas más críticas; sin embargo, otras regiones vulnerables son la Zona Metropolitana de Monterrey y el centro de Sinaloa.

RECOMENDACIONES

Las estrategias de adaptación ante el cambio climático pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos: zonas urbanas y zonas agrícolas. Sin embargo, no resulta factible considerar una región única y exclusivamente dentro de uno de los dos grupos. Es decir, en todas las regiones existen localidades urbanas y áreas de riego, pero en la mayoría existe un grupo predominante que típicamente caracteriza las actividades productivas correspondientes. Se consultaron los PAPSHE correspondientes al Distrito Federal, Estado de México, Chihuahua, Sinaloa y Guanajuato. A continuación se presentan los resultados más relevantes correspondientes al eje de cuencas y acuíferos en equilibrio en las cinco células catalogadas con "Muy alta" vulnerabilidad ante el cambio climático, describiendo las estrategias necesarias que permitirían mejorar el grado de resiliencia (grado de adaptabilidad).

ZONAS URBANAS

En las ciudades, las acciones tienen un fuerte énfasis en el sector público-urbano. En términos generales, se recomienda minimizar las pérdidas en redes de agua potable; promover el uso eficiente del agua mediante la instalación de muebles sanitarios de baja demanda; fomentar e incentivar el reúso del agua gris en viviendas, por ejemplo, el reúso doméstico del agua en los ciclos de lavado, así como promover el riego de jardines públicos con agua tratada, entre otras medidas.

VALLE DE MÉXICO_DF

La población total en el año 2010 era de casi nueve millones de habitantes, siendo la totalidad prácticamente urbana y con una alta densidad poblacional

de casi 6,000 habitantes/km². La brecha que se tiene que cubrir al 2030 en el Distrito Federal es de 689 hm³ y la inversión total correspondiente asciende a 150,000 millones de pesos. Dentro de los proyectos prioritarios, se contempla la construcción del proyecto de captación de Temascaltepec, el cual aportaría un volumen de 110 hm³, con una inversión de 7,500 millones de pesos. La reparación de fugas en redes de distribución permitiría recuperar 103 hm³, con un costo de 950 millones de pesos. Otras medidas, que en su conjunto permitirían recuperar aproximadamente 200 hm³, son: la recarga artificial de acuíferos en terrenos naturales, promover el reúso de aguas tratadas para el riego de parques públicos, instalar regaderas eficientes en las viviendas, programas para controlar la presión en las redes de distribución y estrategias relativas a la captación de agua de lluvia. Estas medidas tienen un costo de inversión de aproximadamente 5,000 millones de pesos.

Resulta de gran importancia continuar con las tareas de mantenimiento, rehabilitación, operación y modernización de sistemas de abastecimiento de agua potable de la ciudad de México, tanto del sistema de pozos de abastecimiento del Valle de México y el Sistema Cutzamala, como de los pozos operados por el gobierno del Distrito Federal y del Sistema Lerma. Estos proyectos requieren de una inversión del orden de los 115,000 millones de pesos. Destaca el proyecto de Operación y Mantenimiento del Sistema Cutzamala, que por sí solo requiere de aproximadamente un 75% de la inversión total. Si bien estos proyectos no aportan a la brecha de manera directa, el no realizar las inversiones correspondientes implicaría perder paulatinamente los volúmenes que aportan y costosas operaciones de rehabilitación.

VALLE DE MÉXICO_MEX

La célula de Valle de México_Méx forma parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y cuenta con una importante actividad económica. La brecha, al 2030, es de 877 hm³ y la ejecución de los proyectos necesarios requiere una inversión de 13,400 millones de pesos. Dentro de las medidas prioritarias, se contempla: recarga artificial de acuíferos, reparación de fugas en redes, reúso de aguas grises y sectorización y control de presión en redes de agua potable, así como la instalación de muebles sanitarios de uso eficiente tales como inodoros, mingitorios secos y regaderas de bajo flujo. Se recomiendan acciones de operación y mantenimiento en los sistemas urbanos de distribución de agua potable.

ZONAS AGRÍCOLAS

En las zonas de riego el enfoque se concentra en acciones destinadas a disminuir las demandas de riego y recuperación de volúmenes, por ejemplo: promover el uso de cultivos de baja demanda, incentivar la aplicación de técnicas avanzadas de riego (goteo, aspersión estándar, microaspersión, alta presión, riego localizado, hidroponía, acuaponía, etc.), revestimiento de canales en las redes de distribución y la operación óptima de las presas y sistemas de distribución.

MEDIO LERMA_GTO

Esta célula concentra la mayor superficie de riego del estado de Guanajuato, localizándose la mayor parte de los distritos de riego 011 Alto Río Lerma, 085 La Begoña y 087 Rosario-Mezquite. La célula Medio Lerma Guanajuato presenta una brecha al 2030 de 1,270 hm³ y la inversión total necesaria asciende a 35,700 millones de pesos. Es factible recuperar 863 hm³ en el sector agrícola mediante un mejoramiento en la eficiencia de las redes de distribución primaria y secundaria (revestimiento de canales), proyectos de riego por aspersión y por alta precisión, así como impulsar el riego en tiempo real en todos los distritos de riego. Mientras

que en el medio urbano sería posible recuperar 142 hm³ por medio de tareas para controlar la demanda, como es la reducción de la presión del agua, reparación de fugas domésticas, industriales, comerciales y municipales. Al mismo tiempo, se sugiere la recarga artificial de acuíferos, reúso potencial de agua tratada y cosecha de lluvia.

En cuanto a obras de infraestructura que incrementan el grado de resiliencia a las sequías, se prevé que el proyecto El Zapotillo beneficie a Guanajuato y Jalisco. Dicho proyecto consiste en una presa de aproximadamente 910 hm³ con una altura de cortina de 105 metros, un acueducto de 140 kilómetros de longitud y 2.54 metros de diámetro, una planta potabilizadora, un macrocircuito de distribución de 43 kilómetros en la ciudad de León, dos plantas de bombeo y tanque de almacenamiento de 100,000 metros cúbicos.

El objetivo del proyecto hidráulico es que garantice el suministro de agua potable en los próximos treinta años a cerca de 2.36 millones de personas de 14 municipios. Este proyecto brindará una mayor seguridad en el abastecimiento de agua potable a la ciudad de León, Guanajuato, con 3.8 m³/s, y permitirá suministrar 1.8 m³/s a la región de Los Altos de Jalisco. El proyecto El Zapotillo forma parte del Plan Nacional de Infraestructura (*Diario Oficial de la Federación*, 2014).

Por otra parte, la presa El Realito, con capacidad de 50 hm³, fue inaugurada en octubre de 2012. Dicho embalse suministrará agua potable a más de 1.5 millones de habitantes (León, Celaya y la ciudad de San Luis Potosí, principalmente).

RFS_SINALOA NORTE_SIN

En esta célula se ubican los DR 063 Guasave, 075 Río Fuerte y 076 Valle del Carrizo, con una superficie total y cultivada promedio de 378,465 y 345,000 hectáreas respectivamente, con una eficiencia promedio del 43%, según ciclos 2000-2005 (CONAGUA, 2009). La brecha hídrica para el 2030 asciende a 752 hm³, mientras que las inversiones correspondientes ascienden a 2,400 millones de pesos. Los proyectos de inversión se concentran en el mejoramiento de la eficiencia global de riego. Del volumen total a recuperar, se estima que un 25% podría ser en la red primaria, un 25% en la red secundaria y un 50% en la parcela. Es necesario el uso de técnicas avanzadas de irrigación, como son el riego de alta presión, la calendarización de riego, el riego por aspersión y la labranza óptima. Reviste importancia la construcción de la primera etapa del Canal Fuerte Mayo, el cual aportaría 74 hm³, con una inversión de 660 millones de pesos.

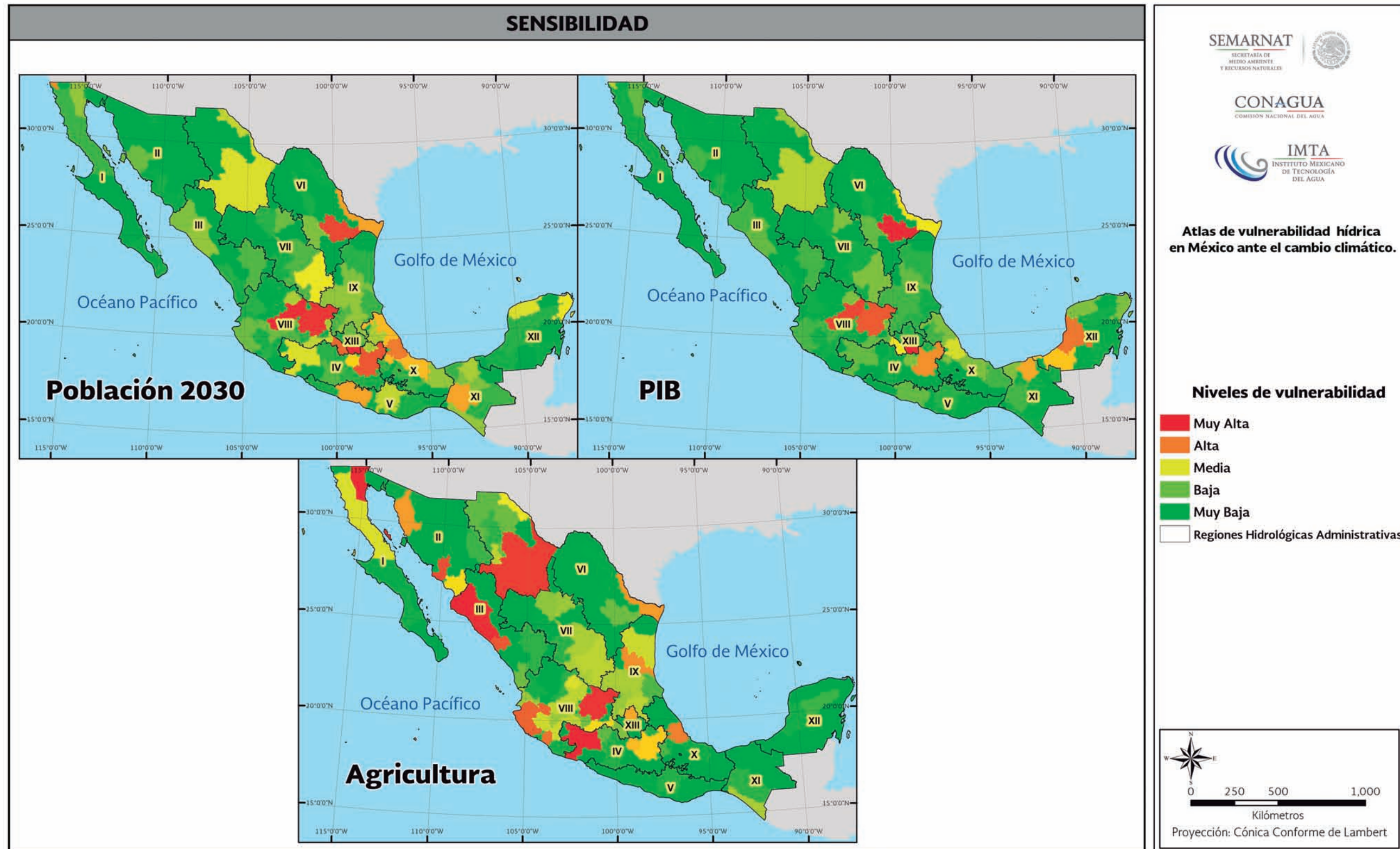
CONCHOS_CHIH

La brecha hídrica al 2030 es de 1,440 hm³, mientras que la inversión total es de 21,500 millones de pesos. En esta célula se ubican los distritos de riego 090 Bajo Río Conchos, 103 Río Florido y 005 Delicias. En estos distritos las tareas encaminadas a recuperar este volumen se enfocan a proyectos de riego por aspersión, calendarización del riego y riego en tiempo real. Mientras que en las unidades de riego, se sugiere mantener buenas prácticas de labranza para una mejor conservación de la humedad en los terrenos agrícolas y el uso del riego localizado.

Por otra parte, en el sector público-urbano se recomienda incorporar dispositivos ahorradores en el uso doméstico, sectorización de redes de distribución, uso de mingitorios secos y reúso de aguas grises en uso doméstico. Sin embargo, no es recomendable el uso de regaderas ahorradoras dada la gran cantidad de sulfatos y carbonatos contenidos en gran parte del agua subterránea.

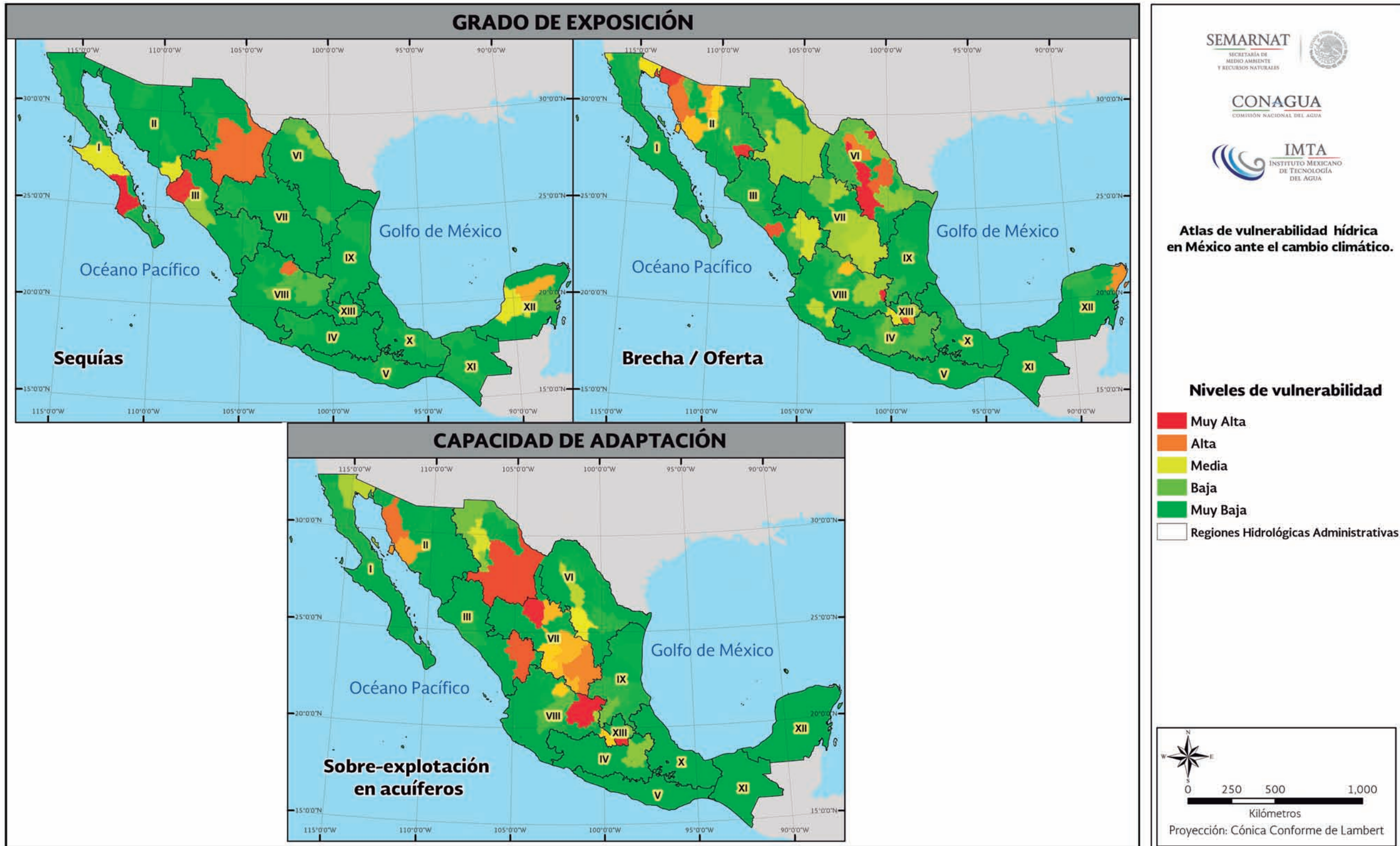
COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA GLOBAL

Mapa 4.1



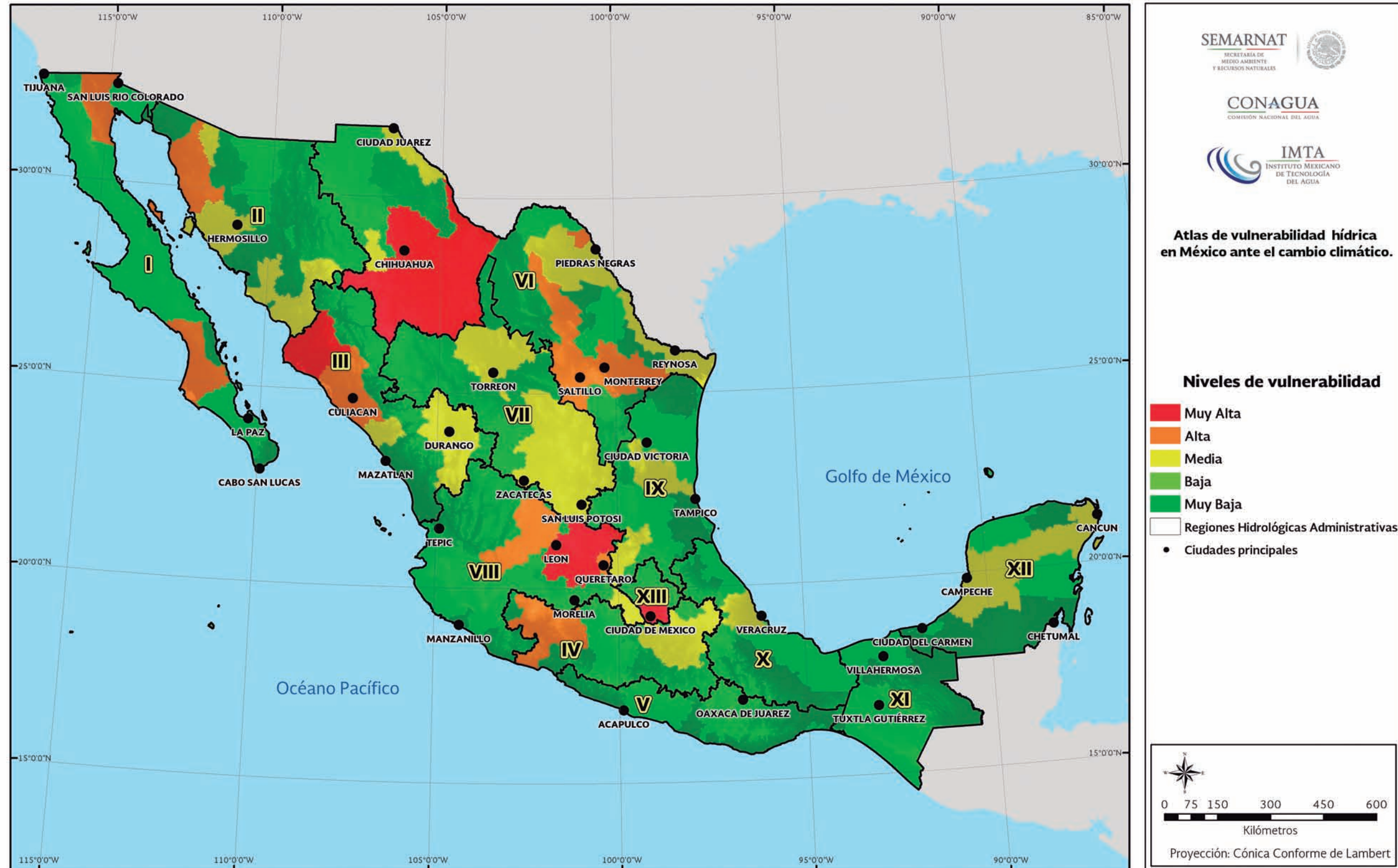
COMPONENTES DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA GLOBAL

Mapa 4.2



VULNERABILIDAD HÍDRICA GLOBAL

Mapa 4.3



COMENTARIOS FINALES

Resulta de gran relevancia el manejo sustentable de los acuíferos, evitando su sobreexplotación y propiciando su recarga natural o inducida. El agua de los acuíferos podría ser considerada como una reserva estratégica que mejore el grado de adaptabilidad durante una sequía, dado que es de esperarse que durante una carencia extrema de precipitación los embalses presenten bajos niveles de almacenamiento y, por lo tanto, el agua subterránea sería la única fuente de suministro. Condiciones de sequía extrema en una región con acuíferos sobreexplotados podría generar problemas sanitarios en la sociedad y un posible colapso de las actividades económicas. El reto de la generación actual será revisar que las propuestas de adaptación sean ambientalmente sustentables. Por ejemplo, respetando el gasto ecológico en los ríos y evitando la sobreexplotación de los acuíferos.

En las células clasificadas con un grado de vulnerabilidad “Muy alto” (5) y “Alto” (13), son necesarias la elaboración e implementación de planes de contingencia ante las sequías y que se asignen responsabilidades concretas y compromisos a los actores, tanto usuarios como dependencias. Estos planes requerirán de un alto grado de participación social.

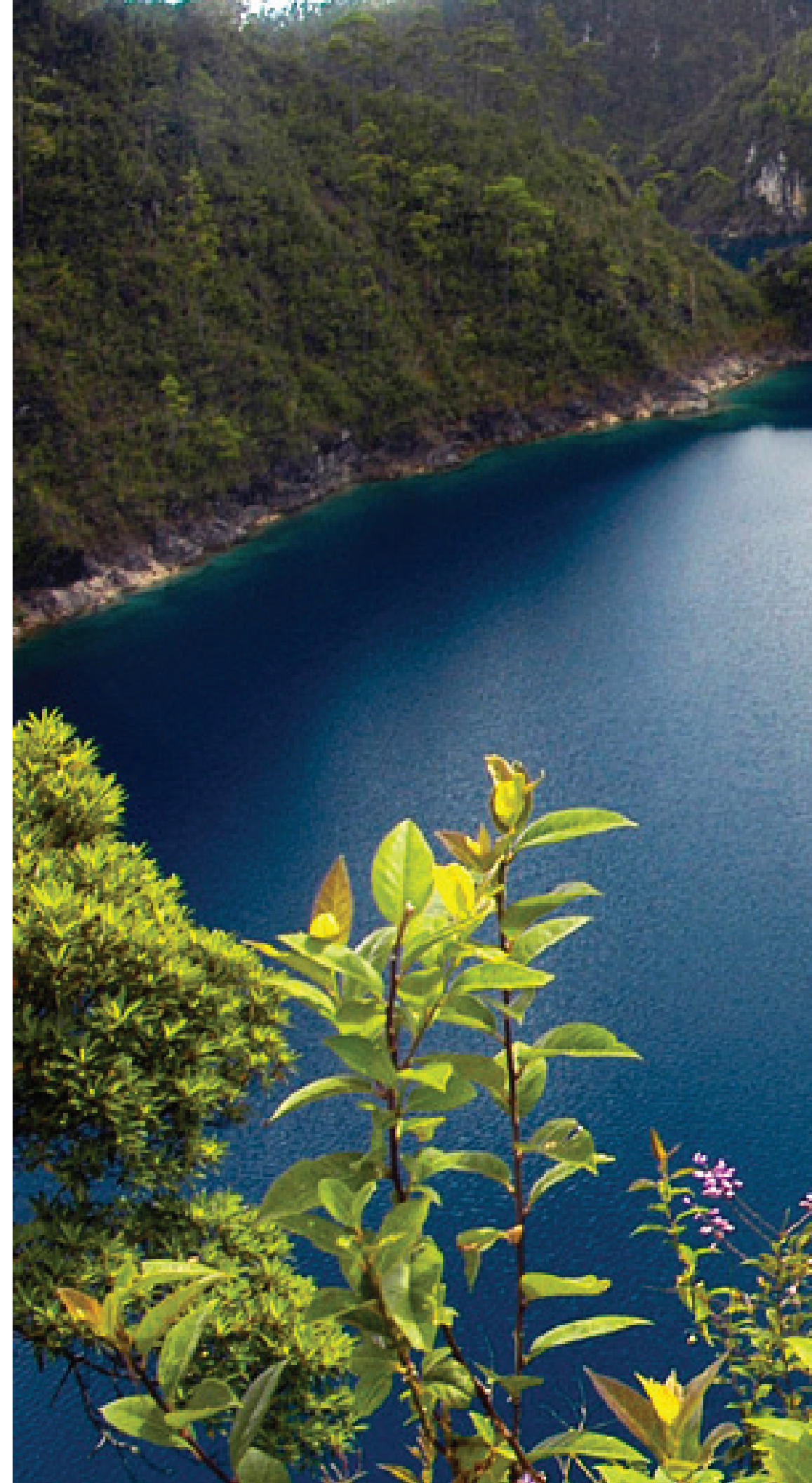
Una de las características del poblamiento rural es su tendencia a la dispersión. En efecto, la distribución espacial de la población rural constituye uno de los retos de política pública más desafiantes. Aproximadamente, diez millones de personas viven en 170,000 localidades con menos de quinientos habitantes (CONAPO, 2009).

La elevada fragmentación y dispersión de la población rural eleva los costos de transporte, reduce la calidad de los servicios públicos y fomenta la producción de autoconsumo. Esto incide negativamente en el proceso de desarrollo y en los niveles de marginación y pobreza. Esta situación es particularmente compleja en las localidades indígenas, las cuales generalmente habitan en espacios más o menos extensos en asentamientos menores a cien habitantes, normalmente, en regiones de difícil acceso debido a una compleja situación orográfica de los lugares en que residen, lo cual representa un reto para la provisión de servicios básicos y su integración productiva. Ello se refleja en sus elevados niveles de marginación (CONAPO, 2009). Es de esperarse que las comunidades con alto grado de marginación presenten una mayor vulnerabilidad ante una sequía, dado que carecen de los medios ambientales y económicos necesarios para suplementar bajos niveles en el escurrimiento superficial que permitan sustentar sus actividades humanas y productivas.

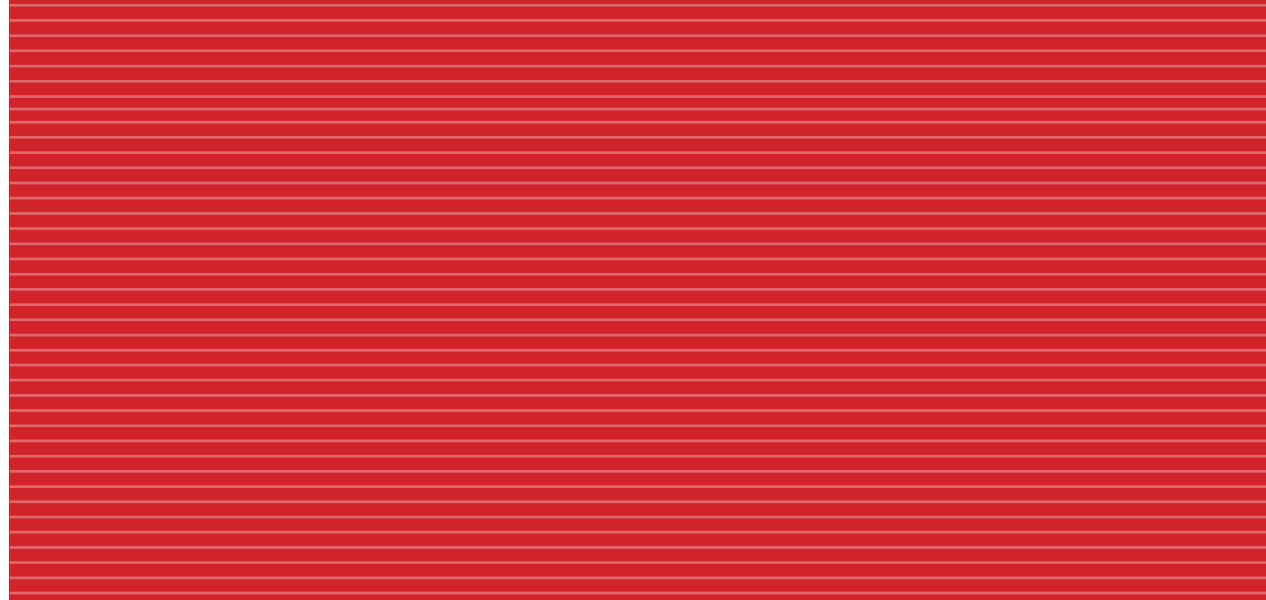
En México existen aproximadamente 15 millones de hectáreas con riego de temporal, las cuales se benefician exclusivamente con la precipitación que cae directamente en las parcelas. Lo anterior origina que las áreas de bajo temporal sean especialmente vulnerables ante las sequías, dado que carecen de una fuente confiable de suministro, como podría ser un embalse o un pozo. El uso de cultivos de baja demanda podría aminorar los efectos adversos de las sequías; sin embargo, no sería posible aplicar esta medida en todos los casos debido a los usos y costumbres arraigadas históricamente en las comunidades rurales. Afortunadamente, existen avances científicos relevantes en cuanto al desarrollo de cultivos resistentes a las sequías.

REFERENCIAS

- Comisión Nacional del Agua (CNA) (2000), Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2009), *Sistema de Información de Planes Directores, Sipladir-2009*, Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Gerencia de Distritos y Unidades de Riego.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2010), Análisis Técnico Prospectivo-ATP, Subdirección General de Programación.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2011), Agenda del Agua 2030, <http://www.conagua.gob.mx>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2012a), Monitor de sequía de América del Norte, Servicio Meteorológico Nacional, <http://smn.conagua.gob.mx>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2012b), Programas Hídricos Regionales Visión 2030. Subdirección General de Programación, SGP. Ciudad de México.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2009), Capítulo X. “Dispersión de la población y desarrollo rural”, Informe de ejecución del Programa de Acción de la Conferencia Internacional sobre la Población y el Desarrollo 1994-2009, México, D. F. <http://www.conapo.gob.mx/>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2010), Proyecciones de la población de México 2005-2050.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2014), Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018. Secretaría de Gobernación. Ciudad de México.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2010), Capítulo 4. “Aguas superficiales”, Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, vol. III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático, Jiutepec, Morelos, México.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2012), Bases para una Estrategia de Desarrollo Bajo en Emisiones en México. México: Gobierno Federal. <http://www.ine.gob.mx/descargas/dgipea/ine-ecc-ec-02-2012.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2012), Producto Interno Bruto por entidad federativa 2005-2009.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007), “Summary for Policymakers”, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), “Summary for Policymakers”, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- OECD (2012), Organisation for Economic Co-Operation and Development, *Environmental Outlook to 2050*, OECD Publishing, Paris, France.
- Rivas, I.; Montero, M. (2013), “Downscaling Technique to Estimate Hydrologic Vulnerability to Climate Change: an Application to the Conchos River Basin”, *Mexico, Journal of Water and Climate Change*, 4(4), 440-457.
- Rivas, I.; Montero, M. (2014), “Assessment of Surface Runoff Vulnerability to Climate Change of the Lerma-Chapala Basin, Mexico”, *Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers (ASCE)*.







CAPÍTULO 5

VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE RIEGO MEXICANA AL CAMBIO CLIMÁTICO: ACTUALIZACIÓN 2014

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez,
Ronald E. Ontiveros Capurata y Mauro Iñiguez Covarrubias





RESUMEN

El riego es una práctica fundamental en la agricultura, principalmente en las zonas áridas y semiáridas del país, sin el cual no se podría alcanzar una producción rentable. La variabilidad climática y los efectos potenciales del cambio climático constituyen las principales amenazas de la agricultura de riego en el presente siglo. En este contexto, resulta primordial caracterizar la vulnerabilidad de las zonas agrícolas de riego asociada a los efectos potenciales del cambio climático, antes de priorizar y aplicar medidas de adaptación en las regiones más vulnerables.

En este capítulo se actualizan los mapas de vulnerabilidad generados en 2010, con base en un conjunto mejorado de indicadores físicos, técnicos y socioeconómicos desarrollados para estimar la vulnerabilidad de las zonas de riego en el país para los ciclos agrícolas otoño-invierno y primavera-verano. La actualización de los mapas de vulnerabilidad ante el cambio climático, y en especial para la agricultura de riego, es esencial ante la generación de nuevos escenarios y mejor conocimiento de la variabilidad climática.

Se usaron los escenarios regionalizados más recientes de cambio climático para México de temperatura y precipitación para fines del presente siglo; específicamente el escenario de emisiones RCP8.5. Indicadores normalizados para la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático fueron calculados espacialmente para generar mapas de vulnerabilidad en todo el país. El análisis de la vulnerabilidad de las zonas de riego ante el cambio climático en sus tres componentes: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, brinda un análisis más integral del problema y permite identificar las zonas más vulnerables y prioritarias.

Los mapas clasifican las zonas agrícolas de riego en cinco niveles de vulnerabilidad: “Muy alto”, “Alto”, “Medio”, “Bajo” y “Muy bajo”, los cuales pueden servir como apoyo para definir políticas gubernamentales y elaborar planes de adaptación en regiones prioritarias para la aplicación de recursos y políticas dirigidas a contrarrestar, de manera más eficiente, los impactos potenciales del cambio climático en la agricultura de riego.

Los resultados indican que las zonas agrícolas más vulnerables son las zonas marginadas, con baja capacidad de adaptación y limitado desarrollo tecnológico y socioeconómico, magnificados por su exposición al cambio climático.

INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) indica que, debido al incremento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, los flujos térmicos y dinámicos de la atmósfera han sido modificados, lo que ha ocasionado gradualmente un cambio climático global. Los Modelos de Circulación General (MCG) prevén para México incrementos significativos de la temperatura y una disminución de la precipitación para fines del siglo XXI, con un incremento en la frecuencia de años menos lluviosos y más calientes en la mayor parte del territorio nacional (Salinas *et al.*, 2014; Montero *et al.*, 2013). El sector agrícola será afectado por estos cambios climáticos por su alta sensibilidad a cambios en los factores ambientales. Diversos estudios de impactos del cambio climático, basados en respuestas biofísicas de los cultivos, indican que el cambio climático podría provocar repercusiones adversas en la agricultura (Ojeda *et al.*, 2008). La intensificación del cambio climático afectará la disponibilidad del recurso hídrico disponible para riego, en cantidad y distribución.

Varias zonas de riego del país son actualmente vulnerables a la variabilidad climática debido a la baja disponibilidad hídrica, producto de los periodos de sequía recurrentes en el pasado reciente. La agricultura de riego representa una actividad esencial para el desarrollo del país y la seguridad alimentaria; por ende, es de interés nacional caracterizar su vulnerabilidad con el propósito de contar con instrumentos cuantitativos de apoyo para definir políticas públicas que identifiquen las regiones agrícolas más vulnerables al cambio climático.

Este trabajo es una actualización del capítulo 5 del *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, elaborado por el IMTA (Ojeda *et*

al., 2010), donde se presenta un análisis espacio-temporal de la vulnerabilidad al cambio climático de las zonas de riego de México, con base en indicadores biofísicos y socioeconómicos actualizados a la información disponible al año 2013.

PANORAMA DE LA AGRICULTURA DE RIEGO EN MÉXICO

México es un país tradicionalmente agrícola que cuenta con 30 millones de hectáreas potencialmente cultivables para uso agrícola, y que representan el 15% de su superficie total (INEGI, 2009). Anualmente se cosechan, en promedio, cerca de 20 millones de hectáreas, que representan el 70% de la superficie agrícola, con un rango de variación de 60 a 85%.

Para el periodo 1996-2012, la superficie anual cosechada promedio fue de 19.5 millones de hectáreas (figura 5.1), de las cuales 26% corresponden a la modalidad de riego y 74% a la modalidad de temporal. La superficie cosechada bajo riego es menor que la de temporal; sin embargo, la productividad bajo riego (expresada en \$/ha) es 300% mayor que la de temporal. Por ello, las zonas de riego contribuyen con 53% y las zonas de temporal con 47% del valor total de la producción cosechada.



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

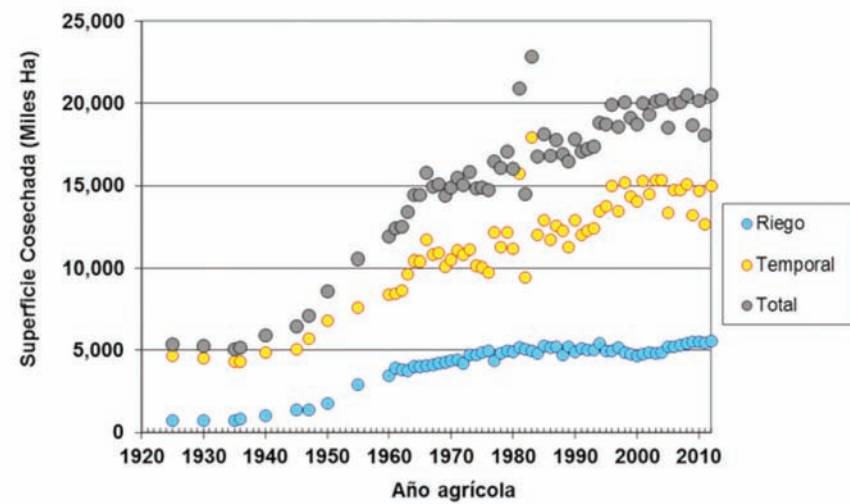


Figura 5.1 Evolución anual histórica de la superficie cosechada por modalidad (elaboración propia con datos del SIAP, 2013; CONAGUA, 2013).

En el México prerrevolucionario, el desarrollo de las zonas de riego fue esencialmente de carácter privado. Posteriormente, la consolidación de los gobiernos federales, al finalizar el periodo revolucionario y la promulgación de la ley sobre irrigación en 1926, permitieron la creación de la Comisión Nacional de Irrigación para impulsar el desarrollo de la agricultura de riego. En el periodo de 1926-1931 se realizaron importantes inversiones que dieron inicio a los grandes distritos de riego. En 1931 se estableció el primer distrito de riego en Pabellón, Aguascalientes, abastecido por la presa Plutarco Elías Calles. Actualmente, México cuenta con 85 distritos de riego que cubren 54% de la superficie de riego y 39,000 unidades de riego que cubren la superficie de riego restante (CONAGUA, 2010). La distribución actual de las unidades y distritos de riego se muestra en el mapa 5.1.

La agricultura de riego ha sido un factor importante para el desarrollo del país. México ocupa el sexto lugar mundial en superficie agrícola con infraestructura para riego, estimada en 6.5 millones de hectáreas (CONAGUA, 2010). Sin embargo, desde la década de los años setenta, únicamente se cultivan, en promedio, cinco millones de hectáreas (figura 5.1), que incluye segundos cultivos. El porcentaje promedio de segundos cultivos en los últimos veinte años es del orden de 11% de la superficie física de riego anual cultivada, estimada en 4.4 millones de hectáreas, que representa 68% de la superficie agrícola con infraestructura de riego.

La agricultura de riego reporta una siniestralidad de 3.5% en los últimos 33 años agrícolas, mientras que para la agricultura de temporal o secano es de 14.7% (figura 5.2). Lo anterior obedece a una mayor dependencia de la agricultura de temporal por la cantidad y distribución de la lluvia y por el paquete tecnológico usado. Una mayor variabilidad y menor distribución de la precipitación impactarán en los cultivos de temporal, incrementando su siniestralidad.

MARCO METODOLÓGICO

En los sistemas de producción agrícola intervienen factores físicos, químicos y biológicos, así como factores socioeconómicos e institucionales (Loucks y

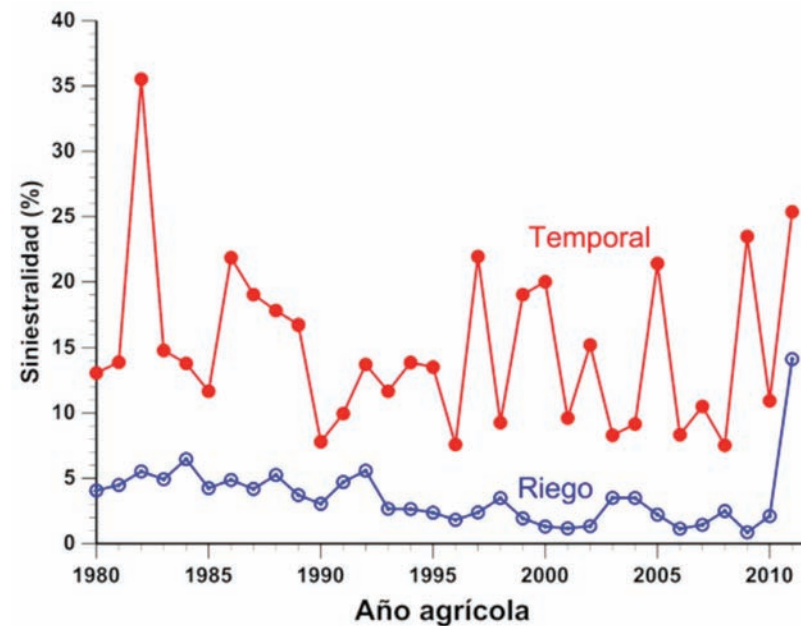


Figura 5.2 Siniestralidad de la agricultura por modalidad (Elaboración propia con datos del SIAP, 2013).

Van Beek, 2005). Un sistema de producción agrícola incluye tres subsistemas interdependientes:

- El subsistema natural (SN) contiene los procesos físicos, químicos y biológicos.
- El subsistema socioeconómico (SSE) incluye las actividades sociales (humanas) relacionadas con el uso de sistemas de producción agrícola.
- El subsistema institucional (SI) involucra el contexto legal, regulatorio y organizacional donde ocurren los procesos de decisión, planeación y manejo agrícola.

En la figura 5.3 se muestran los tres subsistemas que interactúan en un sistema de producción agrícola.

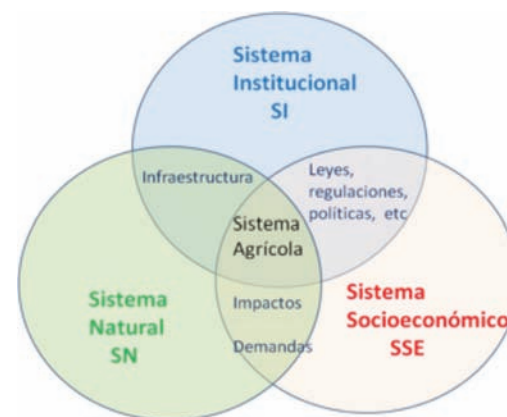


Figura 5.3. Interacciones en un sistema de producción agrícola (Loucks y Van Beek, 2005).

El término vulnerabilidad se aplica en las disciplinas naturales y sociales, y se define según la orientación y perspectiva del estudio. Indica el grado de fragilidad de un individuo o sistema. En un contexto social y ambiental, la vulnerabilidad se refiere a la pérdida potencial de una característica inherente del individuo (grupo o sistema), o una función que combina la sensibilidad y la intensidad con la cual el individuo o sistema es sensible. En este estudio la vulnerabilidad al cambio climático es el grado en que un sistema agrícola es capaz de afrontar los efectos adversos de dicho fenómeno, incluyendo la variabilidad climática y las características del sistema que definen su sensibilidad y capacidad adaptativa para responder a dichos cambios.

El IPCC (2001) señala que la vulnerabilidad es una función de tres componentes: exposición (E), sensibilidad (S) y capacidad de adaptación (CA). La exposición se define como la posibilidad de un sistema de quedar expuesto a un cambio ante una posible situación desestabilizadora positiva o negativa. La sensibilidad se refiere al grado en que un sistema responde a fluctuaciones del entorno. La capacidad de adaptación está relacionada con la resiliencia. Se refiere a la capacidad de un sistema para recuperar su estado inicial ante un cambio permanente o temporal de su entorno. Los estudios de vulnerabilidad son la base para definir acciones de adaptación y mitigación al cambio climático en regiones críticas detectadas por interrelaciones de los componentes de vulnerabilidad, tal como se indica en la figura 5.4.

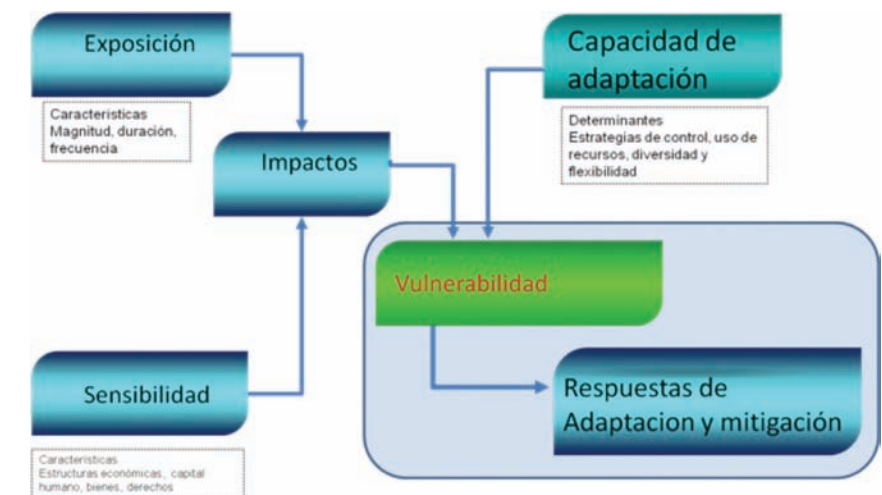


Figura 5.4 Componentes para evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático (Gbetibou y Ringler, 2009).

La vulnerabilidad (V) de un sistema al cambio climático se expresa a través de sus dos componentes (figura 5.4): impactos potenciales (I), que representan la magnitud del daño natural esperado cuando se conjugan determinadas condiciones climáticas, y la CA, que representa la habilidad del sistema para soportar los impactos, recuperarse o adaptarse al cambio climático. La vulnerabilidad es función de I y CA; I es función de E y S; esta relación puede ser expresada mediante la siguiente ecuación.

$$V = f(I - CA) = f(E + S - CA) \quad (5.1)$$

De acuerdo con la ecuación 5.1, a mayor impacto mayor es la vulnerabilidad; mientras que, a mayor capacidad de adaptación, menor es la vulnerabilidad.

ZONAS DE RIEGO DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Mapa 5.1



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Simbología

- Distritos de riego
- Unidades de riego
- Entidad federativa

Elaboración propia con información de INEGI (2005), usando datos vectoriales de uso del suelo y vegetación Serie III



Proyección: Cónica Conforme de Lambert

VARIABLES Y FUENTES DE DATOS

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene establecido para propósitos de gestión del agua, que un año agrícola comprende del 1° de octubre de un año cualquiera, al 31 de septiembre del año siguiente. En relación a la duración del ciclo fenológico de los cultivos, en un año agrícola pueden establecerse dos tipos de cultivos: cultivos anuales, cuyo ciclo es inferior a 12 meses, y perennes, cuyo ciclo es mayor de 12 meses. Los ciclos anuales puede ser: otoño-invierno (OI) y primavera-verano (PV). La caracterización de la vulnerabilidad de la agricultura de riego se realizó por ciclo agrícola; el ciclo OI cubre el periodo de octubre a marzo del siguiente año y el ciclo PV de abril a septiembre.

La mayor parte de las zonas de riego, principalmente localizadas en áreas áridas y semiáridas del país, presentan precipitaciones menores a 150 mm en el ciclo OI (mapa 5.2), por lo que requieren de riego para suministrar los requerimientos hídricos de los cultivos. En cambio, en el ciclo PV, el riego es suplementario en la mayor parte del país, ya que la lluvia aporta buena parte de los requerimientos de riego de los cultivos.

La temperatura media en el ciclo OI presenta valores cercanos al rango deseable para los cultivos (mapas 5.2 y 5.3), en la mayoría de las regiones bajo agricultura de riego. Las temperaturas mínimas pueden ser críticas en algunas épocas del ciclo OI, mientras que las temperaturas máximas pueden restringir el desarrollo óptimo de los cultivos en el ciclo PV.

Los datos de las variables climáticas históricas y proyectadas corresponden a una malla regular de 50 km x 50 km, mientras que las variables socioeconómicas y productivas se describen en el ámbito de municipios. De manera que estados con mayor número de municipios, como Oaxaca, Puebla, Veracruz y Estado de México, presentan mejor resolución espacial que estados con menor número de municipios, como Baja California y Baja California Sur.

En los cuadros 5.1, 5.2 y 5.3 se describen las variables, indicadores asociados, unidades y fuente información para cada componente de vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. En forma adicional, se identifican también las relaciones funcionales entre el indicador y la vulnerabilidad. Se identifican dos tipos de relaciones funcionales: relación directa o inversa del valor de indicador con la vulnerabilidad. Por ejemplo: a mayor temperatura mayor será la vulnerabilidad al cambio climático, mientras que a mayor cobertura de crédito agrícola en un municipio menor es la vulnerabilidad del productor al cambio climático.

EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

En este estudio se utilizó la nueva familia de escenarios climáticos llamados "Trayectorias de Concentración Representativas" (RCP, por sus siglas en inglés), que sustituyen a los antiguos escenarios A1B y A2 usados en la versión anterior del Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Se usaron proyecciones mensuales promedio de la temperatura y la precipitación con una malla regular de 50 km x 50 km para el periodo 2075-2099, obtenida por técnicas estadísticas de reducción de escala a partir de proyecciones de modelos MCG. La base de datos climática usada fue generada por Cavazos *et al.* (2013), usando promedios ponderados para fin de siglo de las proyecciones de 14 MCG para el escenario RCP8.5 de emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo con la metodología del ensamble ponderado detallada por Montero *et al.* (2013). Este escenario es el

más extremo y supone un aumento de 8.5 W/m² de energía liberada para el año 2100, debido al incremento de gases de efecto de invernadero (Moss *et al.*, 2010).

El periodo de referencia considerado en este estudio fue de treinta años (1971-2000), y los valores históricos de las variables climáticas para México fueron extraídos de la base de datos TS3.21 de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia de Inglaterra, conocida como CRU, por sus iniciales en inglés (Climate Research Unit), que presenta series de datos mensuales en el periodo 1901-2012 a una resolución aproximada 50 km x 50 km (Harris *et al.*, 2014).

En el cuadro 5.1 se resumen los indicadores aplicados para estimar el grado de exposición al cambio climático. Los primeros cuatro indicadores representan las anomalías de las variables climáticas del periodo 2075-2099, con respecto al periodo base 1971-2000. Los dos últimos indicadores definen el riesgo por ciclones, lluvias torrenciales y el área inundable por incremento del nivel del mar. Las zonas agrícolas costeras tienen mayor vulnerabilidad debido a posibles efectos potenciales del incremento en la actividad ciclónica, así como por incremento en el nivel del mar asociado a efectos del cambio climático.

Cuadro 5.1. Indicadores y fuente de datos para estimar la exposición climática como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Unidad	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Anomalía de la temperatura media diaria en el ciclo agrícola	ΔT _{med}	Anomalía proyectada en °C en el ciclo agrícola para el periodo 2075-2099, con respecto al periodo base	ΔT _{med} ↑ => Vul ↑	Actualización de escenarios de cambio climático para México (Salinas <i>et al.</i> , 2014; Cavazos <i>et al.</i> , 2013) Base de datos histórica de CRU (Harris <i>et al.</i> , 2014)
Anomalía de la temperatura máxima diaria en el ciclo agrícola	ΔT _{max}	Anomalía proyectada en °C en el ciclo agrícola para el periodo 2075-2099, con respecto al periodo base	ΔT _{max} ↑ => Vul ↑	
Anomalía de la precipitación acumulada en el ciclo agrícola	ΔPrecip	Cambio proyectado en % de la precipitación acumulada en el ciclo agrícola para el periodo 2075-2099, con respecto al periodo base	ΔPrecip ↑ => Vul ↑	
Probabilidad de sequías en el ciclo agrícola	Sequía	Anomalía proyectada del índice estandarizado de precipitación (SPI6) para seis meses en los ciclos OI (marzo) y PV (septiembre) para el periodo 2075-2099, con respecto al periodo base	ΔSequia ↑ => Vul ↑	
Riesgo por ciclones	Ciclones	Riesgo por ciclones y lluvias	Ciclones ↑ => Vul ↑	Mapa de riesgo por lluvia y ciclones (Prieto <i>et al.</i> , 2014)
Nivel del mar 5m	Mar	Área inundable, asumiendo un incremento del nivel de mar de 5 m	NMar ↑ => Vul ↑	Mapa de elevación del nivel del mar (CREGIS, 2010)

SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

La sensibilidad al cambio climático se refiere al grado en que un sistema agrícola responde, positiva o negativamente, a cambios en los patrones climáticos. En el cuadro 5.2 se presentan los indicadores usados para estimar la componente de sensibilidad con la finalidad de evaluar la vulnerabilidad al cambio climático.

En el cuadro 5.2 se incluye el índice de diversificación de cultivos (I_d), relacionado con el grado de sensibilidad de un sistema agrícola al cambio climático. A mayor diversificación de un sistema agrícola, menor es su sensibilidad. Este índice

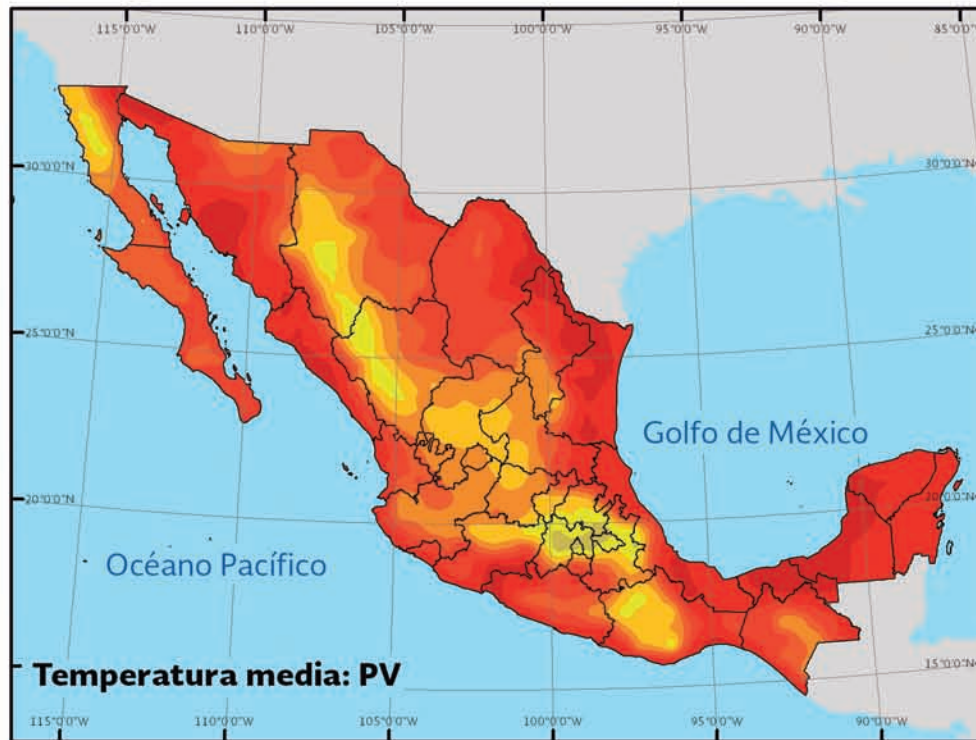
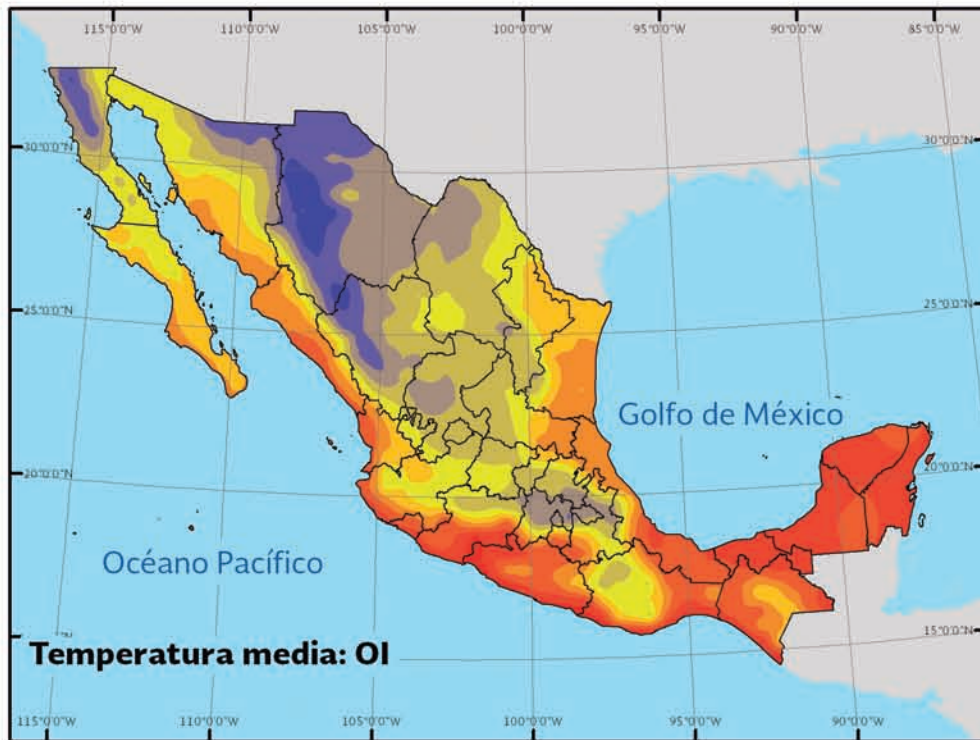
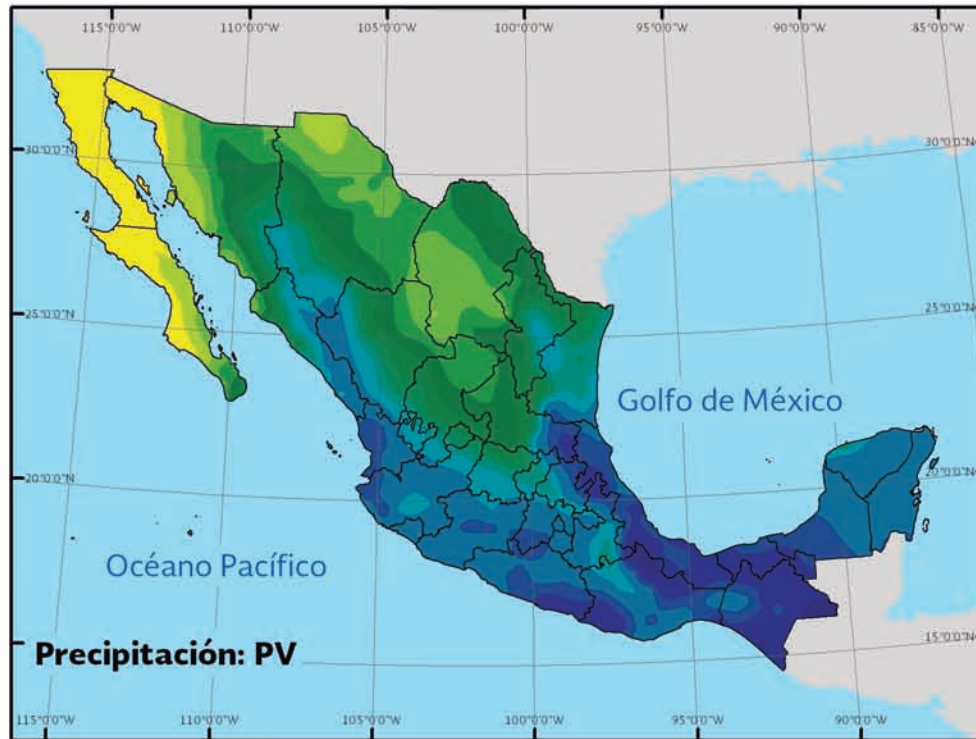
se estimó adaptando el índice de diversidad de Simpson, usado en ecología (Magurran, 1988), de acuerdo con la siguiente expresión:




$$I_d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_c} A_i^2}{A_t^2} \quad (5.2)$$

Donde A_i es el área cosechada del cultivo i en hectáreas; A_t es el área total cosechada en la zona agrícola de interés en hectáreas, y N_c es el número total del cultivos reportados. Un valor cercano a uno para el índice de diversidad I_d indica una gran diversidad de cultivos y, en consecuencia, baja vulnerabilidad, mientras que un valor de cero indica un monocultivo y alta vulnerabilidad.

CLIMATOLOGÍA PERIODO BASE 1/2

Mapa 5.2



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.


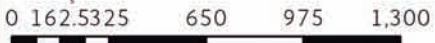
Precipitación [mm]

0 - 50	350 - 400
50 - 100	400 - 500
100 - 150	500 - 750
150 - 200	750 - 1,000
200 - 250	1,000 - 1,500
250 - 300	> 1,500
300 - 350	

Temperatura [°C]

6 - 8	18 - 20
8 - 10	20 - 22
10 - 12	22 - 24
12 - 14	24 - 26
14 - 16	26 - 28
16 - 18	28 - 30

Elaboración propia con datos de CRU para el periodo de referencia 1971 - 2000

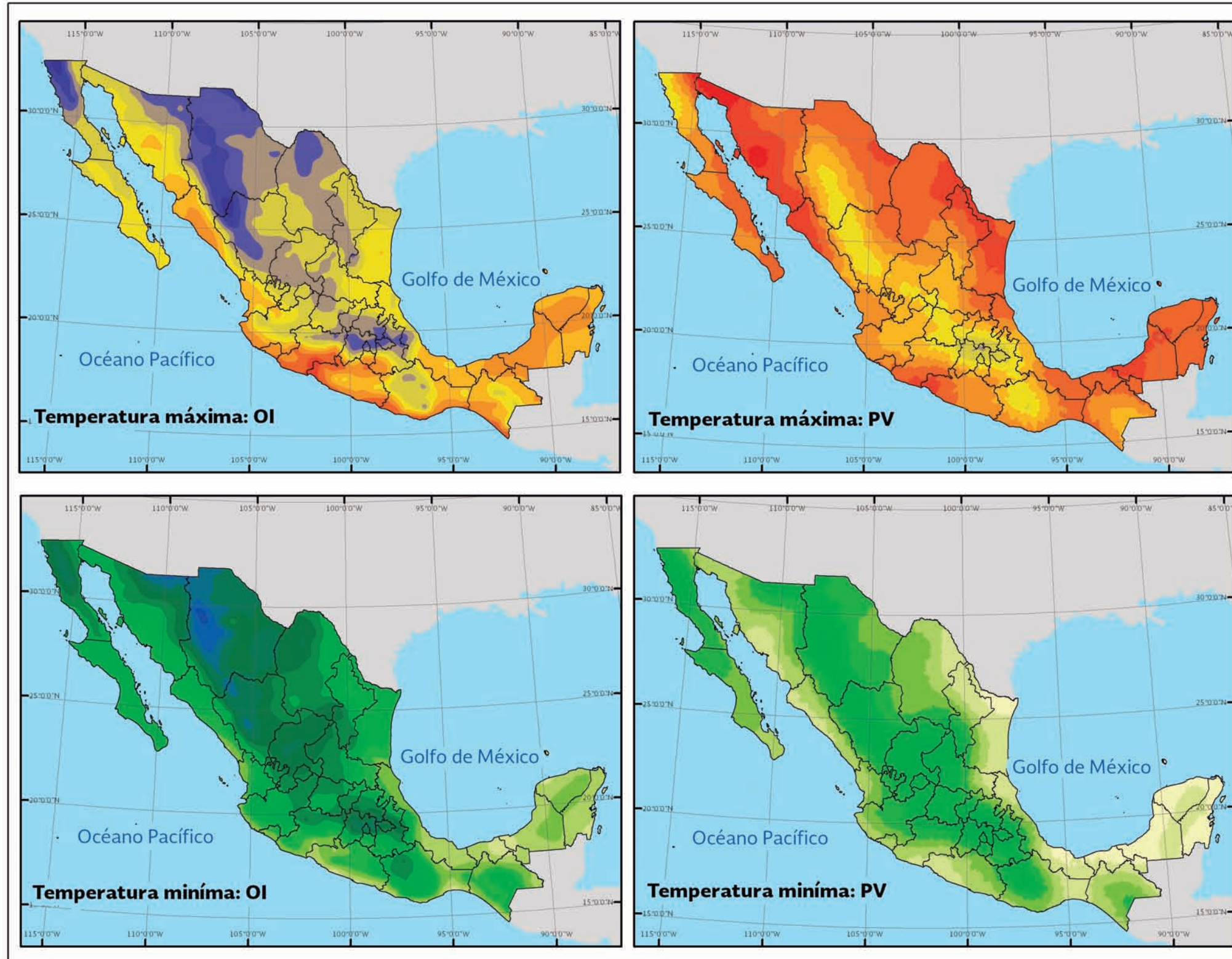



 0 162.5325 650 975 1,300 Kilómetros

 Proyección: Cónica Conforme de Lambert

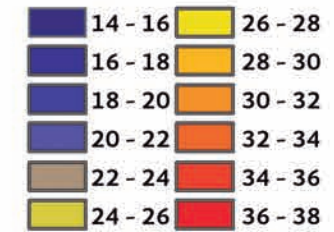
CLIMATOLOGÍA PERIODO BASE 2/2

Mapa 5.3

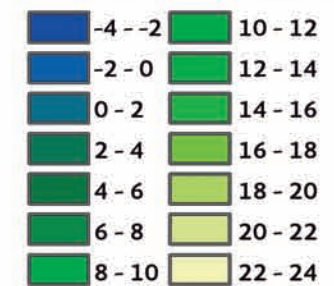


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

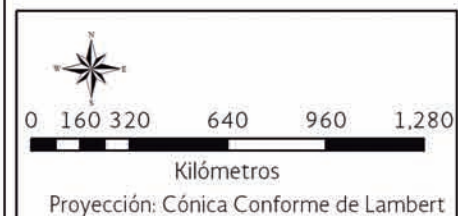
Temperatura máxima [°C]



Temperatura mínima [°C]



Elaboración propia con datos de CRU para el periodo de referencia 1971 - 2000



Cuadro 5.2. Variables y fuente de datos para estimar la sensibilidad como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Unidad	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Población rural	Rural	% población con menos de 5,000 habitantes	Rural ↑ => Vul ↑	CONAPO (2010)
Tamaño parcela	Sup	Superficie de la parcela media de riego	Sup ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Uso de fertilizantes	Fertiliza	Uso de fertilizantes	Fertiliza ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Eventos catastróficos	Catastróficos	Eventos catastróficos hidrometeorológicos en ámbito municipal, registrados por Fonden y Sagarpa	Catastróficos ↑ => Vul ↑	Base de datos de eventos catastróficos (CENAPRED, 2013)
Evapotranspiración	ETo	Evapotranspiración anual de referencia acumulada	ETo ↑ => Vul ↑	Trabucco y Zomer, 2009
Degradación de suelos y acuíferos	Degrada	Suelos con problemas de sales solubles y/o sodio intercambiable y acuíferos con problemas de salinización, intrusión salina o sobreexplotación	Degrada ↑ => Vul ↑	INEGI (1998) CONAGUA (2009)
Cultivos perennes	Perennes	% de cultivos perennes con respecto a cultivos anuales (OI+PV); promedio para los años agrícolas 2002-2011	Perennes ↑ => Vul ↑	SIAP, 2013
Diversidad de cultivos	I _d	Índice adimensional estimado con la ecuación 5.2, que relaciona la suma de cuadrados de las superficies por cultivo con respecto al cuadrado de la suma total de la superficie cosechada por ciclo agrícola. Promedio para los años agrícolas 2002-2011	I _d ↑ => Vul ↓	SIAP, 2013
Variabilidad en la precipitación	Precip	Desviación estándar de la precipitación anual acumulada en periodo base (1971-2000)	Desv ↑ => Vul ↑	Base de datos histórica de CRU (Harris et al., 2014)
Siniestralidad	Siniestros	Siniestralidad promedio, superficie siniestrada con respecto a la sembrada por ciclo agrícola, para los años agrícolas 2002-2011	Siniestros ↑ => Vul ↑	SIAP, 2013
Rendimiento	Rend	Rendimiento máximo del maíz de riego en ámbito municipal para los años agrícolas 2002-2011	Rend ↑ => Vul ↓	SIAP, 2013
Precipitación acumulada	Precip	Precipitación acumulada promedio en el ciclo agrícola para el periodo base (1971-2000)	Precip ↑ => Vul ↓	Base de datos histórica de CRU (Harris et al., 2014)
Ondas de calor	Calor	Ondas de calor promedio en el ciclo agrícola, asumidas cuando T _{max} diaria en el mes es mayor de 30 °C para el periodo base (1971-2000)	Calor ↑ => Vul ↑	Base de datos histórica de CRU (Harris et al., 2014)

Un posible indicador de sensibilidad podría ser la variabilidad histórica en la disponibilidad de agua de las zonas de riego, no incluido en este estudio por falta de datos en el país. Conviene anotar también que no fue considerado el efecto en la disponibilidad de agua de las zonas de riego que forman parte de cuencas binacionales compartidas entre México y Estados Unidos, de los ríos Bravo y Colorado, cuyo suministro de agua superficial depende de los derechos de asignación especificados en el Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos de 1944.

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La capacidad de adaptación al cambio climático se define como el grado en que un ajuste en prácticas, procesos o estructuras puede moderar o reducir el daño potencial, o ser una oportunidad de acciones derivadas del cambio climático (Yusuf y Francisco, 2009). La capacidad de adaptación depende de factores socioeconómicos, tecnológicos, institucionales y estructurales de la agricultura. En el cuadro 5.3 se presentan los indicadores usados para estimar la componente de vulnerabilidad derivada de la capacidad de adaptación de las zonas agrícolas, con información disponible en el ámbito de municipios.

VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE RIEGO

Las regiones agrícolas del país son vulnerables a la variabilidad climática actual ocasionada por la recurrencia de sequías y lluvias torrenciales que impactan en el desarrollo de los cultivos. El incremento de la temperatura puede reducir la productividad de los cultivos debido a la reducción de sus periodos de crecimiento y ocurrencia de temperaturas fuera del rango óptimo de su desarrollo. En forma global, la mayoría de los cultivos podrían ser afectados por cambios en los patrones climáticos; particularmente, en regiones que ya muestran valores de estrés hídrico y térmico en forma recurrente (Gadgil, 1995).

La agricultura es una actividad que depende fuertemente de las condiciones ambientales. El mejoramiento de paquetes tecnológicos, basados en el uso de variedades mejoradas e híbridos que dependen de la aplicación óptima de insumos, ha incrementado notablemente la producción agrícola en los últimos años. Estos incrementos pueden disminuir o aun anularse por efectos del cambio climático.

El proceso de apertura económica y liberación de los mercados, debido a la globalización de las economías de los países, ha modificado las estructuras y los sistemas de producción agrícola. En México, el sector rural ha resentido dichos impactos, principalmente en zonas agrícolas con niveles de marginación alta y rentabilidad baja, que ha provocado también una mayor degradación de recursos naturales. El carácter multifuncional de la agricultura ha sido reconocido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en los siguientes aspectos: alimentario, ambiental, económico y social (FAO, 1999). El sector agrícola será también impactado por efectos del cambio climático, por lo que varias zonas productivas podrían experimentar situaciones de crisis. A continuación se describe el proceso para estimar la vulnerabilidad de las zonas agrícola del país.

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Cuadro 5.3. Indicador y fuente de datos para estimar la capacidad de adaptación como componente de la vulnerabilidad al cambio climático.

Indicador	Clave	Unidad	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente
Marginación	Margina	Grado de marginación	Margina ↑ => Vul ↑	CONAPO (2010)
Analfabetismo	Analf	% población analfabeta mayor de 15 años	Analf ↑ => Vul ↑	CONAPO (2010)
Cobertura de servicios	Servicios	% cobertura servicios en domicilios de productor (agua potable, drenaje y electricidad)	Servicios ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Dependientes	Depen	Número de dependientes económicos por productor agrícola	Depen ↑ => Vul ↑	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Acceso a centros urbanos	Tiempo	Tiempo de acceso a centros urbanos	Tiempo ↑ => Vul ↑	Cimmyt (Hodson et al., 2002)
Ingreso agrícola	Agrícola	Porcentaje de ingresos del productor relacionados con la agricultura	Agrícola ↑ => Vul ↑	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Intensidad en el uso de la tierra	IUT	Porcentaje promedio de segundos cultivos en los años agrícolas 2002-2011 (sólo incluye agricultura de riego)	IUT ↑ => Vul ↓	SIAP, 2013
Mecanización agrícola	Mecánica	Porcentaje de agricultores que usan mecanización agrícola	Mecánica ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Cobertura de crédito/ seguro agrícola	Crédito	Porcentaje de cobertura de crédito y seguro	Crédito ↑ => Vul ↓	Censo agropecuario 2007 (INEGI, 2009)

ESTIMACIÓN DE MAPAS DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad de los sistemas de producción agrícola se representa con el apoyo de instrumentos cualitativos (mapas), y su cuantificación se estimó mediante el siguiente procedimiento:

- 1) Se seleccionaron las variables que capturan algún componente de la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas y, además, que contaba con información disponible a escala nacional (cuadros 5.1, 5.2, y 5.3).
- 2) Los indicadores de las variables seleccionadas se normalizaron en el intervalo [0,100] para su comparación (Vincent, 2004), mediante la siguiente expresión:

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Donde X_i es el valor normalizado de los valores de la variable x_i ; x_{\min} y x_{\max} son los valores mínimos y máximo del conjunto de datos x_i , respectivamente. Se asume en la ecuación 5.3 que a mayor valor del indicador mayor es la vulnerabilidad.

Los indicadores normalizados de la componente exposición (E) se presentan en el mapa 5.4 para el ciclo OI y en el 5.5 para el ciclo PV. Los indicadores normalizados de la componente sensibilidad (S) se presentan en los mapas 5.9 al 5.13, mientras que los indicadores normalizados de la componente capacidad de adaptación (CA) se presentan en los mapas 5.16 y 5.17.

- 3) Se estimaron las componentes de vulnerabilidad (E, S, y CA) mediante la siguiente expresión:

$$E, S, CA = \sum_{j=1}^n P_j X_j \quad (5.4)$$

Donde P_j es el factor de ponderación y X_j es el valor normalizado del indicador j para estimar los componentes de vulnerabilidad. El índice de vulnerabilidad varía entre 0 y 1; esto es, de menor a mayor vulnerabilidad, respectivamente. Un valor de 1 indica la mayor vulnerabilidad y viceversa. Estos valores fueron expresados en porcentaje que luego fueron convertidos a formato ráster.

Los pesos (P) de cada indicador fueron estimados con el método propuesto por Iyengar y Sudarshan (1982), con la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{c}{\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}} \quad (5.5)$$

Donde P_i es el peso para el indicador normalizado i ; c es la constante de normalización estimada como la suma total de las inversas de las desviaciones estándar, de los n indicadores seleccionados en componente de vulnerabilidad.

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}} \quad (5.6)$$

El método de Iyengar y Sudarshan asegura que grandes variaciones de uno o más indicadores no dominen la contribución del resto de los demás indicadores.

Como ejemplo se presenta en la ecuación 5.7. La versión de la ecuación 5.4 con los pesos usados para evaluar el componente de exposición E de la vulnerabilidad, de acuerdo con los indicadores del cuadro 5.1.

$$E = 0.152 \Delta T_{\text{med}} + 0.144 \Delta T_{\text{max}} + 0.149 \Delta \text{Precip} + 0.218 \Delta \text{sequia} + 0.131 \text{Ciclones} + 0.207 \text{mar} \quad (5.7)$$

- 4) La vulnerabilidad global V es estimada con la ecuación 5.8, que asume un peso P_i de $1/3$ para cada uno de los componentes de la vulnerabilidad. La capacidad de adaptación fue ajustada para invertirla de signo (ecuación 5.1) e indicar que a mayor capacidad de adaptación menor es la vulnerabilidad, de acuerdo con las relaciones funcionales del indicador, como se muestra en el cuadro 5.3.

$$V = P_1 E + P_2 S + P_3 CA = \frac{E}{3} + \frac{S}{3} + \frac{CA}{3} \quad (5.8)$$

- 5) Se elaboró el mapa de vulnerabilidad global (V) con la aportación de los tres componentes (E, S, y CA) para la zona de estudio, de acuerdo con el cálculo espacial indicado por la ecuación 5.8.

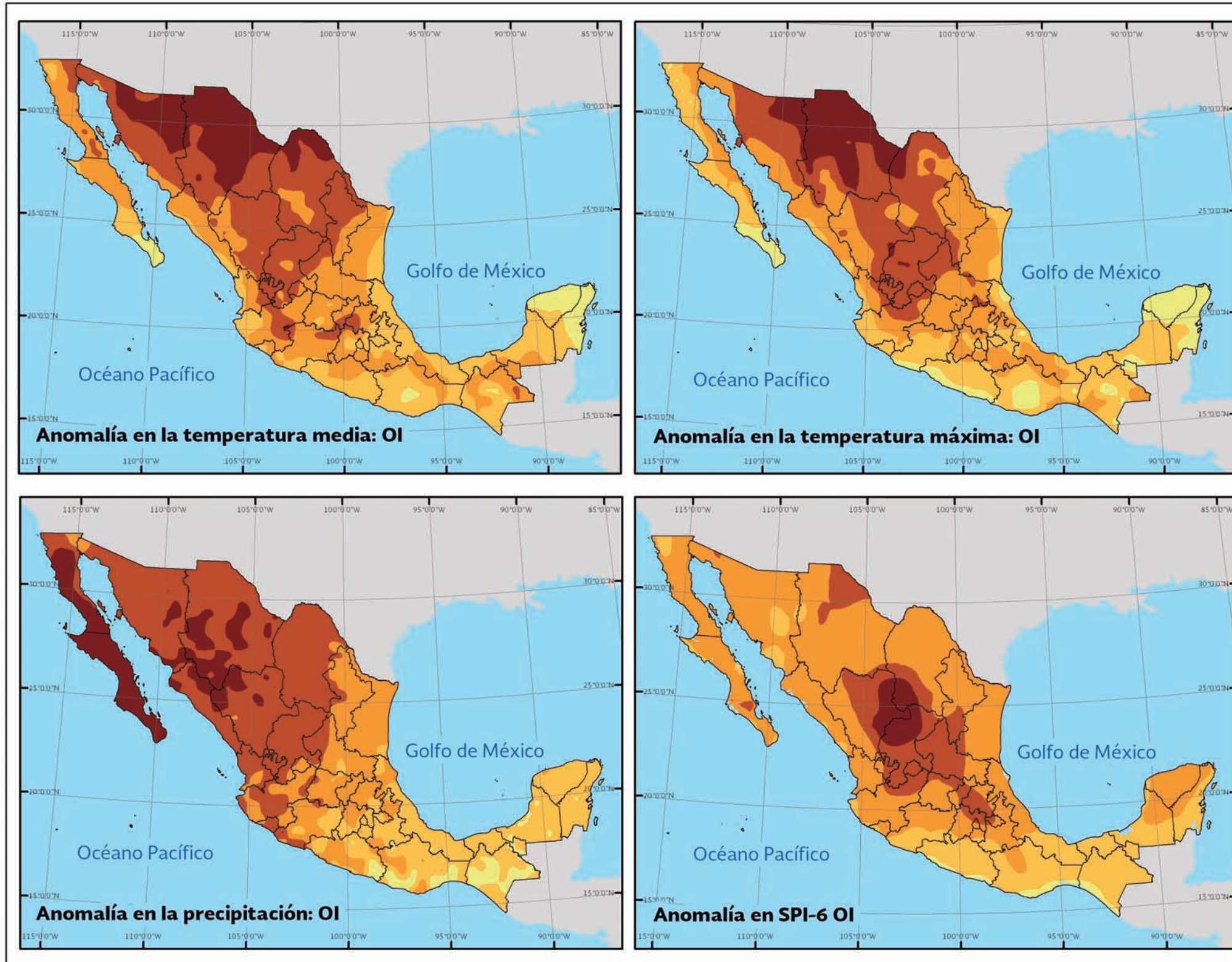
MAPAS DE EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La componente E está relacionada con el grado de estrés climático que se ejerce sobre la zona de estudio. Se asume que las regiones agrícolas con mayores cambios en los patrones de la precipitación y temperatura tendrán mayores impactos en sus sistemas agrícolas. Para estimar el grado de exposición se generaron dos mapas de exposición climática: uno para el ciclo OI y otro para el PV, con seis indicadores cada uno (cuadro 5.1).

Se estimaron las anomalías de las variables climáticas: ΔT_{med} , ΔT_{max} , ΔPrecip y $\Delta \text{sequía}$, y se normalizaron de acuerdo con la ecuación 5.3. Estas anomalías normalizadas, utilizando el escenario RCP8.5, se presentan en el mapa 5.4 para el ciclo OI, y en el mapa 5.5 para el ciclo PV. Para el caso de los indicadores de ciclones y nivel del mar, se elaboró el mapa 5.6.

INDICADORES DE EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO 1/3

Mapa 5.4



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Ciclo: Otoño - Invierno [OI] [Octubre - Marzo]

Grado de vulnerabilidad

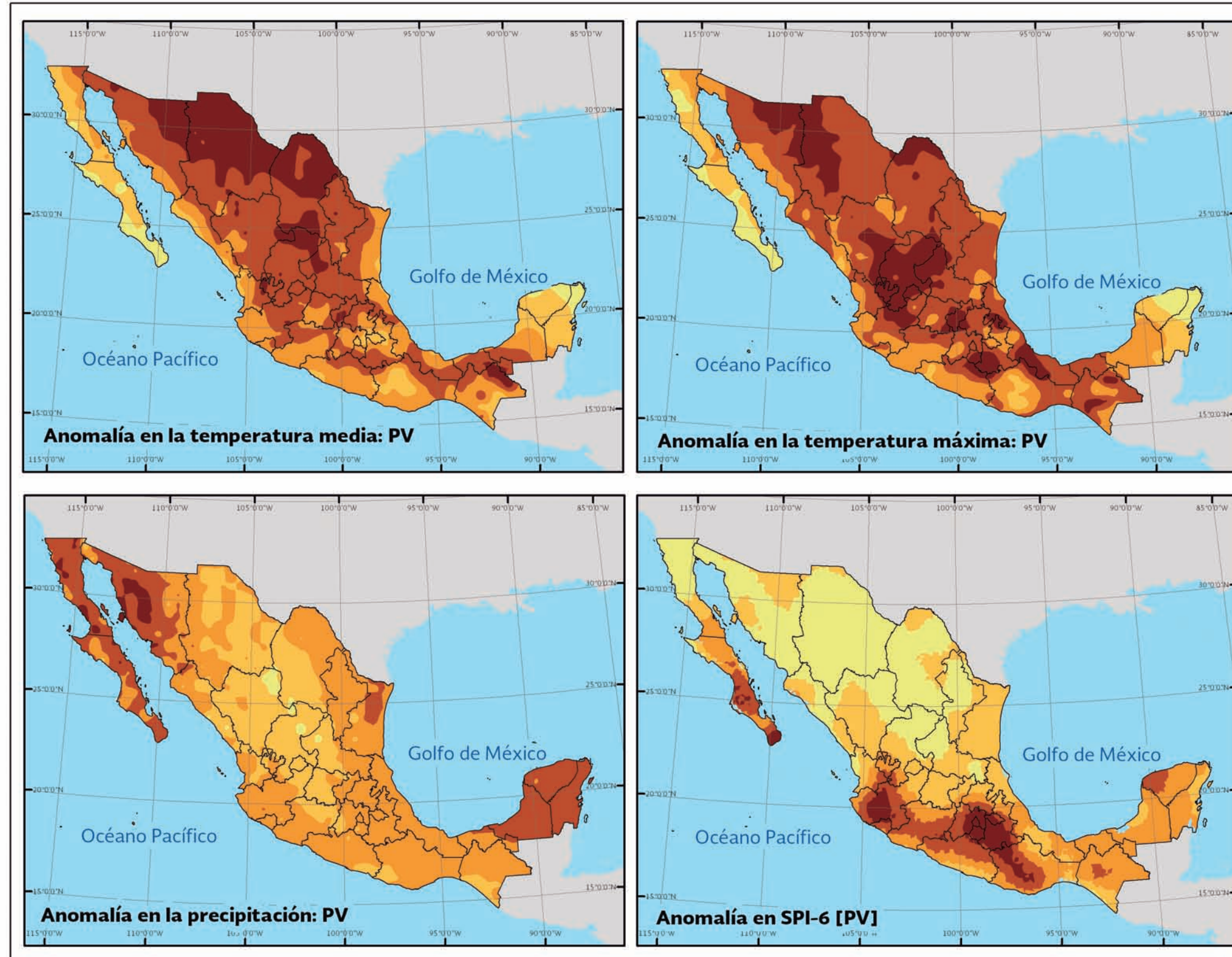
- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia con datos de CRU para el periodo de referencia 1971-2000 y datos proyectados del REA (IMTA), escenario RCP8.5

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

INDICADORES DE EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO 2/3

Mapa 5.5



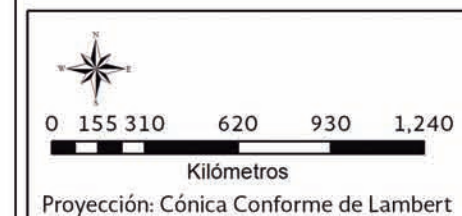
Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Ciclo: Primavera-Verano [PV]
[Abril - Septiembre]

Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy Alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia con datos de CRU para el periodo de referencia 1971-2000 y datos proyectados del REA (IMTA), escenario RCP8.5



INDICADORES DE EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO 3/3

Mapa 5.6



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Indicador del nivel del mar

- Incremento nivel del mar [0 - 100]
- Zonas de riego

Grado de vulnerabilidad [%]

Riesgo por lluvia y ciclones

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia con datos de CRESIS (2010) para el nivel del mar y con datos de Prieto *et al.* (2014) para el cálculo por municipio considerando vulnerabilidad social, precipitación de mayo a noviembre, ingreso de ciclones tropicales, periodo: 1971-2000



0 295 590 1,180 1,770 2,360



Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Se observa que las anomalías (reducción) de precipitación para el ciclo OI resultan más severas que las correspondientes para el ciclo PV (comparando la precipitación OI del mapa 5.4 con el correspondiente para PV del mapa 5.5). Las regiones sur y sureste del país son las regiones de menor vulnerabilidad por exposición a cambios en los patrones de precipitación durante el ciclo OI. La península de Baja California y la región noroeste muestran alta vulnerabilidad a anomalías en la precipitación para ambos ciclos agrícolas, de acuerdo con las proyecciones del escenario RCP8.5. La agricultura de riego será impactada por una reducción en la precipitación en el ciclo OI en las zonas más productivas del norte y noroeste del país, como se muestra en el mapa 5.4. Sin embargo, para el ciclo PV, la vulnerabilidad más alta se concentra en una región reducida del norte del país, cerca de la frontera con Estados Unidos, en el estado de Chihuahua.

Las mayores anomalías en las temperaturas (media y máxima) y, en consecuencia, con mayor vulnerabilidad, se presentan para ambos ciclos en los estados del norte del país que colindan con los Estados Unidos, como se muestra en los mapas 5.4 y 5.5. Se presenta una superficie con mayor vulnerabilidad por exposición a altas temperaturas en el ciclo PV que para el ciclo otoño-invierno.

El cambio climático puede incrementar la intensidad de los eventos ciclónicos que impactan los estados costeros del país. En consecuencia, las zonas agrícolas cercanas al mar presentan la mayor vulnerabilidad por exposición a eventos ciclónicos, principalmente las localizadas en el Pacífico Sur, península de Yucatán, Golfo Centro y Frontera Sur (mapa 5.6). Otra de las repercusiones del cambio climático es el ascenso del nivel del mar. El mapa 5.6 muestra la alta vulnerabilidad de algunas zonas costeras del país por incremento potencial en el nivel del mar, principalmente de Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Quintana Roo, Veracruz y Yucatán.

Usando el escenario RCP8.5 se generó un mapa de exposición al cambio climático para el ciclo OI (mapa 5.7) y otro para el ciclo PV (mapa 5.8). Se observa un incremento en superficie total para las zonas de alta vulnerabilidad para el ciclo OI, con respecto al ciclo PV. El norte del país muestra alta vulnerabilidad por exposición al cambio climático para el ciclo OI. Existen varias zonas de alta vulnerabilidad dispersas para el ciclo PV, localizadas en Jalisco, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Yucatán y en la región central del país (Estado de México, Distrito Federal, Morelos, Puebla y Querétaro).

MAPAS DE SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

En la serie de mapas 5.9 al 5.13 se presentan los indicadores de sensibilidad normalizados indicados en el cuadro 5.2. En el mapa 5.9 se presentan: población rural, tamaño de parcela y uso de fertilizantes. Los indicadores del mapa 5.9 indican la concentración de la población rural, el tamaño pequeño de la parcela y el limitado uso de fertilizantes en una diversidad de municipios distribuidos de manera dispersa a lo largo del país, sobre todo, en cuanto a la vulnerabilidad de población rural y uso de fertilizantes. Por el tamaño de parcela, las zonas más vulnerables están en todo el país, excepto en la región norte (península de Baja

California, parte de Tamaulipas y Nuevo León). En el mapa 5.10 se presentan más indicadores de sensibilidad normalizados: eventos hidrometeorológicos catastróficos, evapotranspiración, degradación de suelos y acuíferos y porcentaje de cultivos perennes. Estos indicadores señalan que existen regiones con alta recurrencia de eventos catastróficos en las regiones norte y Golfo Centro. La evapotranspiración es mucho mayor en la región Pacífico Sur, mientras que las zonas más vulnerables por degradación de suelos y cultivos perennes se ubican en la región norte.

Los mapas 5.11 a 5.13 presentan indicadores asociados con los ciclos agrícolas OI y PV. El mapa 5.11 muestra la diversificación de cultivos y la variabilidad en la precipitación por ciclo agrícola, donde se puede observar que la vulnerabilidad más alta, según estos indicadores, se encuentra dispersa; asimismo, en cuanto a diversificación de cultivos, en la región Pacífico Sur la variabilidad de la precipitación en OI y en la península de Baja California en PV. El mapa 5.12 muestra la variación municipal en la siniestralidad y la productividad agrícola por ciclo. La siniestralidad de la agricultura de riego es baja en la mayor parte del país, con la mayor vulnerabilidad en la península de Yucatán. El mapa 5.13 presenta la precipitación acumulada y la frecuencia de las ondas de calor por ciclo agrícola. Sin duda, un factor que se presentará con mayor frecuencia en el ciclo PV son las ondas de calor, que se intensificarán para fines de siglo principalmente en las regiones norte, golfo y sureste del país. Además, de acuerdo con datos de precipitación acumulada, las zonas de mayor vulnerabilidad están en el norte del país en PV; esta superficie se extiende hasta el centro y Pacífico Sur para el ciclo otoño-invierno.

Integrando los mapas de los indicadores de sensibilidad, se generó un mapa de sensibilidad actual al cambio climático para el ciclo OI (mapa 5.14) y otro para el ciclo PV (mapa 5.15). Varios municipios de los estados de Colima, Guerrero, Michoacán y de la península de Yucatán muestran alta vulnerabilidad por sensibilidad al cambio climático para el ciclo OI (mapa 5.14). Para el caso del ciclo PV, las zonas de alta vulnerabilidad se localizan en los estados del norte del país y las penínsulas de Baja California y Yucatán (mapa 5.15).

MAPA DE CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Los mapas 5.16 y 5.17 muestran los indicadores de capacidad de adaptación normalizados. En el mapa 5.16 se presentan los valores de vulnerabilidad por: marginación, analfabetismo, cobertura de servicios, dependientes económicos y acceso a centros urbanos. En el mapa 5.17 se presenta la vulnerabilidad, según: ingreso agrícola, intensidad en el uso de la tierra, mecanización agrícola y cobertura de crédito/seguro. Los indicadores de capacidad de adaptación asumen que a mayor capacidad de adaptación menor es su vulnerabilidad al cambio climático.

Para los casos de grado de marginación, analfabetismo, cobertura de servicios y número de dependientes económicos, las zonas más vulnerables se concentran en los estados de Sinaloa, Tamaulipas y la región Pacífico Sur, principalmente; aunque si se considera el acceso a centros urbanos, las zonas más vulnerables están en la península de Baja California y las colindancias de los estados Oaxaca y Chiapas.

Para la segunda parte de los indicadores de capacidad de adaptación, gran parte del país presenta alta vulnerabilidad si se considera la diversificación de ingresos y el acceso a créditos y seguros. Las zonas norte, sur y sureste del país son las más vulnerables si se toma en cuenta el grado de mecanización agrícola. Finalmente, si el indicador en la intensidad de uso de la tierra, las zonas más vulnerables están dispersas a lo largo de todo el país.

Se usaron nueve indicadores para evaluar la capacidad de adaptación global al cambio climático. El mapa 5.18 de vulnerabilidad al cambio climático por capacidad de adaptación muestra una concentración de zonas de alta vulnerabilidad en zonas marginadas del sur, sureste y noroeste de México.

MAPAS DE VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA AGRICULTURA DE RIEGO

Los mapas 5.19 y 5.20 muestran la vulnerabilidad espacial al cambio climático de la agricultura de riego para los ciclos agrícolas OI y PV, respectivamente, usando las proyecciones del escenario de emisiones RCP8.5 para fines de siglo. Se observa que la capacidad de adaptación define en buena parte los patrones de vulnerabilidad en regiones de alta marginación, como fue reportado por Yusuf y Francisco (2009).

Varias zonas del país, localizadas en regiones marginadas, son vulnerables principalmente debido a su baja capacidad de adaptación. Los mapas de vulnerabilidad global indican que las zonas de mayor exposición al cambio climático no son necesariamente las zonas de mayor vulnerabilidad global. Para el ciclo OI, las regiones de "Muy alta" y "Alta" vulnerabilidad se concentran en las regiones norte centro, sur y, en menor superficie, la península de Yucatán (mapa 5.19); mientras que para el ciclo PV, las zonas más vulnerables se encuentran dispersas en el norte del país, la costa de Jalisco y la península de Yucatán (mapa 5.20).

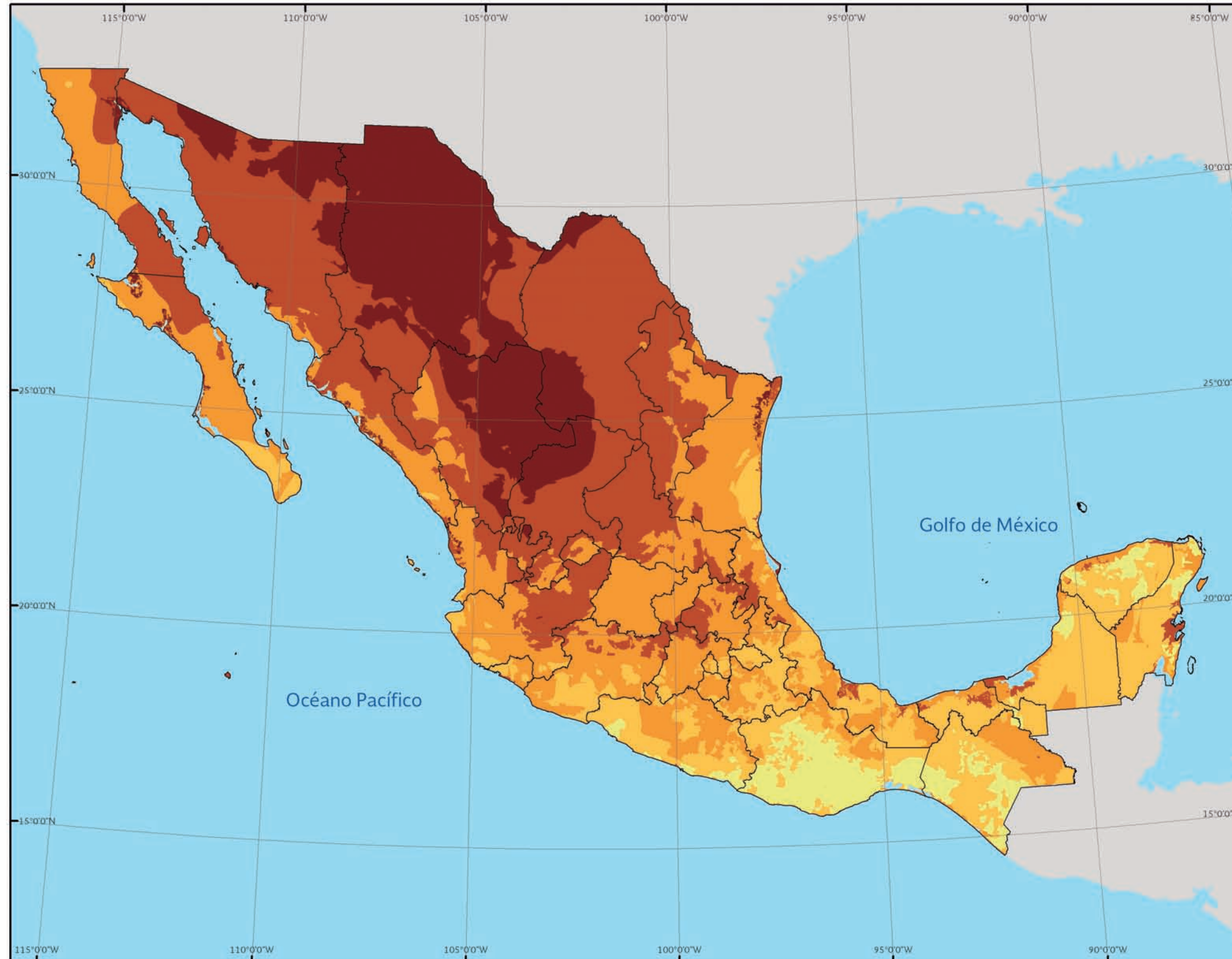
Los cuadros 5.4 y 5.5 presentan la vulnerabilidad global estimada por distrito de riego y para las unidades de riego por entidad federativa, respectivamente, para el ciclo agrícola OI, tomando como referencia el mapa 5.1 para localizar las zonas de riego y el mapa 5.19 para definir el valor de la vulnerabilidad global.

Los resultados del mapa 5.19 integran los tres componentes de la vulnerabilidad: exposición, sensibilidad, y capacidad de adaptación en un solo valor de vulnerabilidad global para el principal ciclo agrícola de las zonas agrícolas bajo riego del país, O-I, usando el escenario de emisiones RCP8.5 para fines de siglo.

Los resultados pueden cambiar si se usa otro ciclo agrícola, otro escenario de emisiones y otra metodología. El cuadro 5.4 indica que de los 85 distritos de riego, cinco presentan "Muy alta" vulnerabilidad global (017, 083, 098, 103, y 110) y doce "Alta". La estimación de la vulnerabilidad global para el ciclo OI, usando la metodología propuesta, indica que las unidades de riego con mayor vulnerabilidad al cambio climático se localizan en las siguientes entidades federativas: Guerrero, Chiapas, San Luis Potosí, Chihuahua, Durango y Colima.

VULNERABILIDAD POR EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO: RCP8.5 1/2

Mapa 5.7



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia escenario: RCP8.5
Ciclo OI: Otoño - Invierno
[Octubre - Marzo]



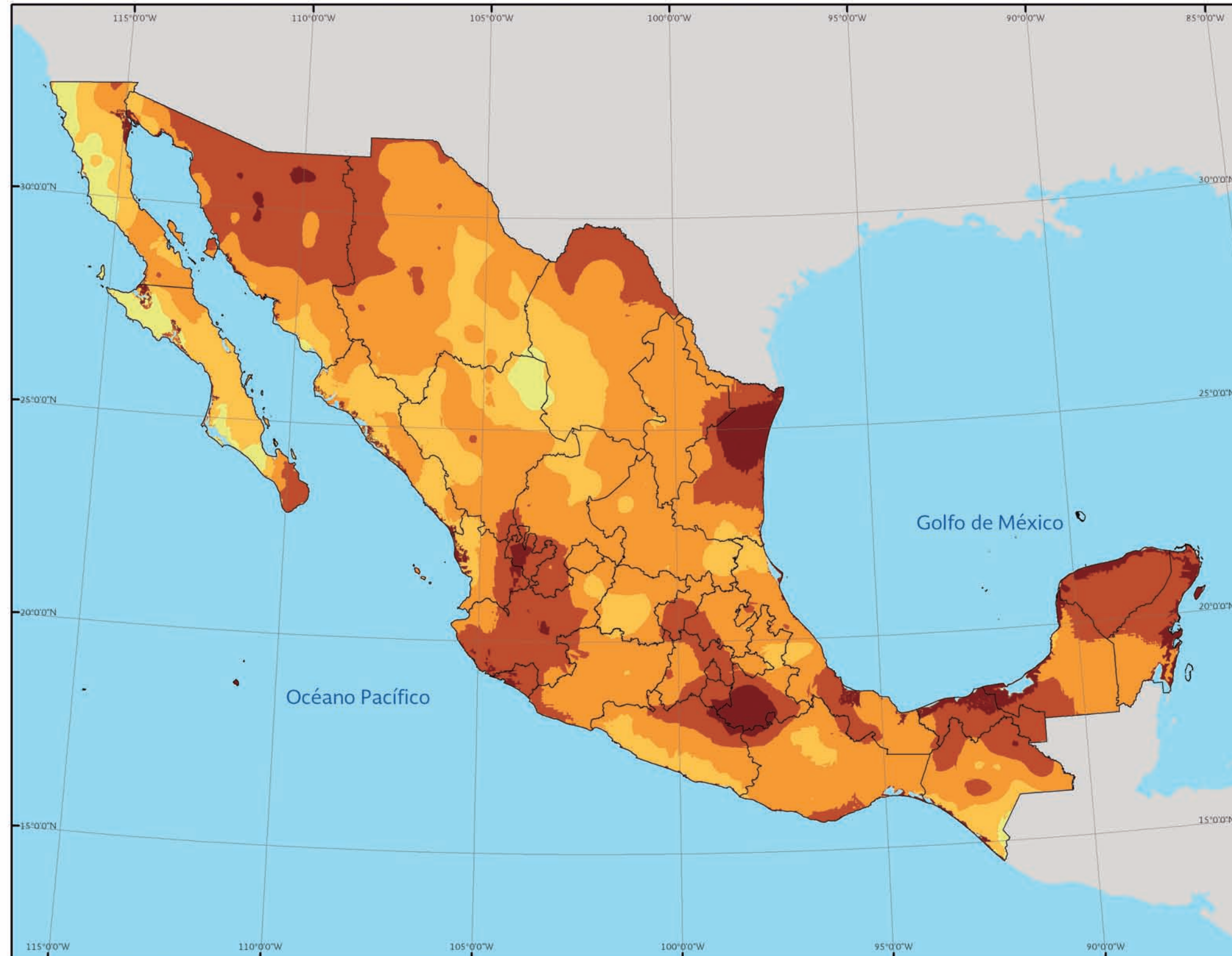
0 70 140 280 420 560

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert.

VULNERABILIDAD POR EXPOSICIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO: RCP8.5 2/2

Mapa 5.8



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia escenario: RCP8.5
Ciclo PV: Primavera - Verano
[Abril - Septiembre]



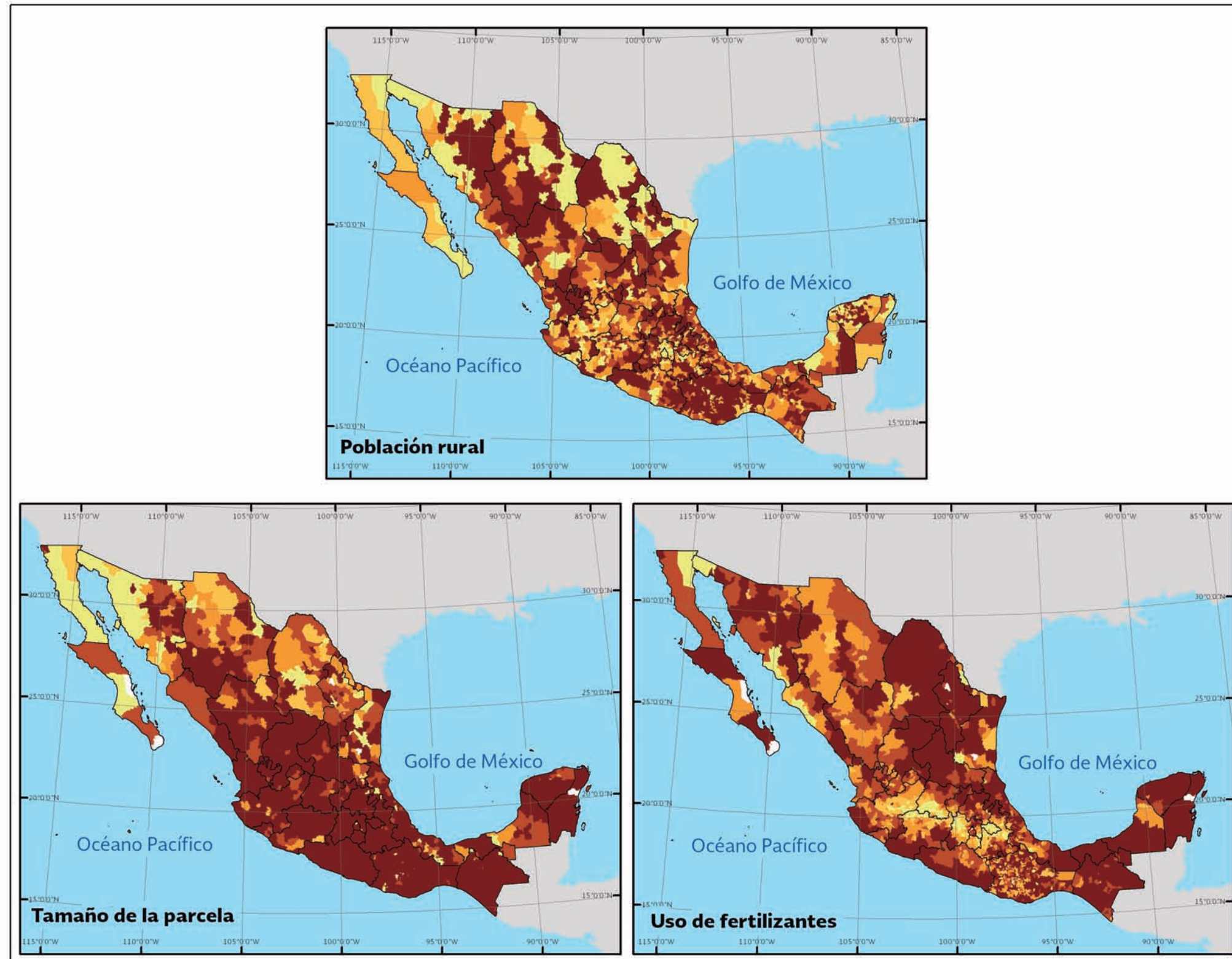
0 70 140 280 420 560

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

INDICADORES DE SENSIBILIDAD 1/5

Mapa 5.9

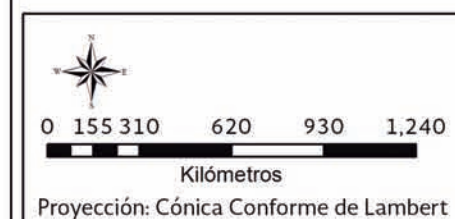


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Grado de vulnerabilidad [%]

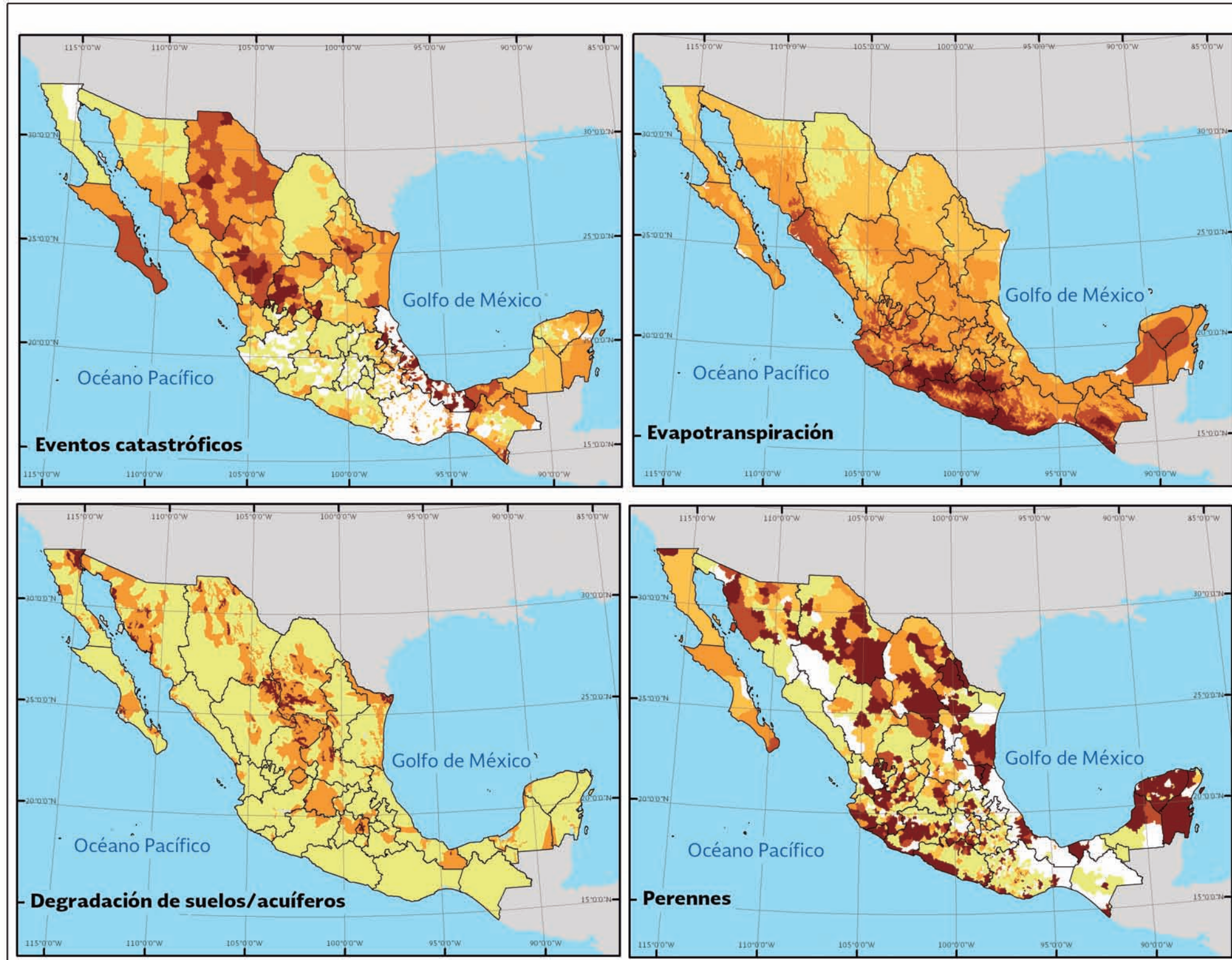
- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia con datos de CONAPO (2010) e INEGI (2009)



INDICADORES DE SENSIBILIDAD 2/5

Mapa 5.10

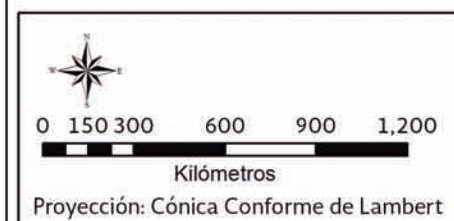


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

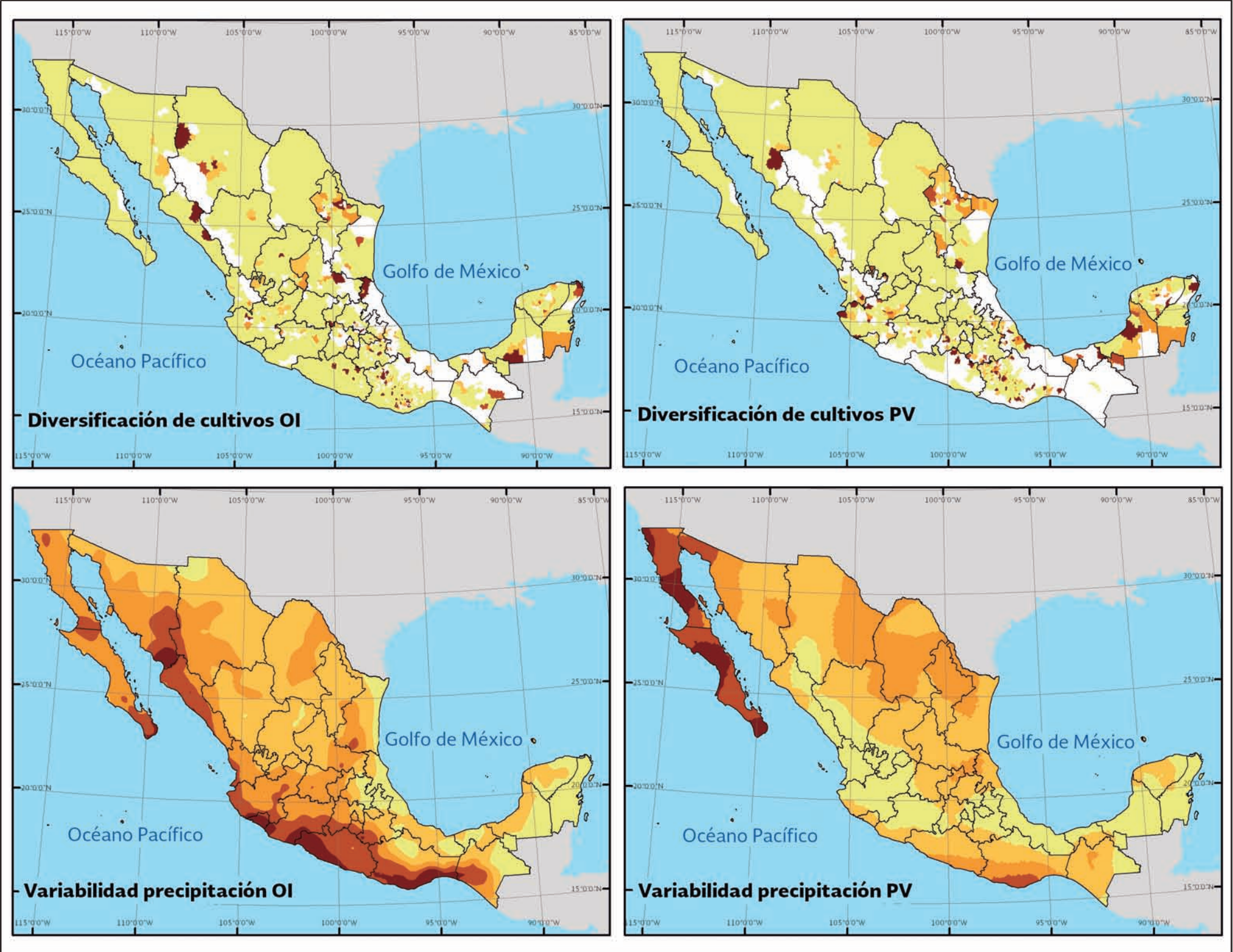
Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja
- Sin riego

Elaboración propia con datos de CENAPRED (2009), TRABUCCO Y ZOMER (2009), CONAGUA (2009), SIAP (2009)



INDICADORES DE SENSIBILIDAD 3/5 Mapa 5.11



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja
- Sin riego

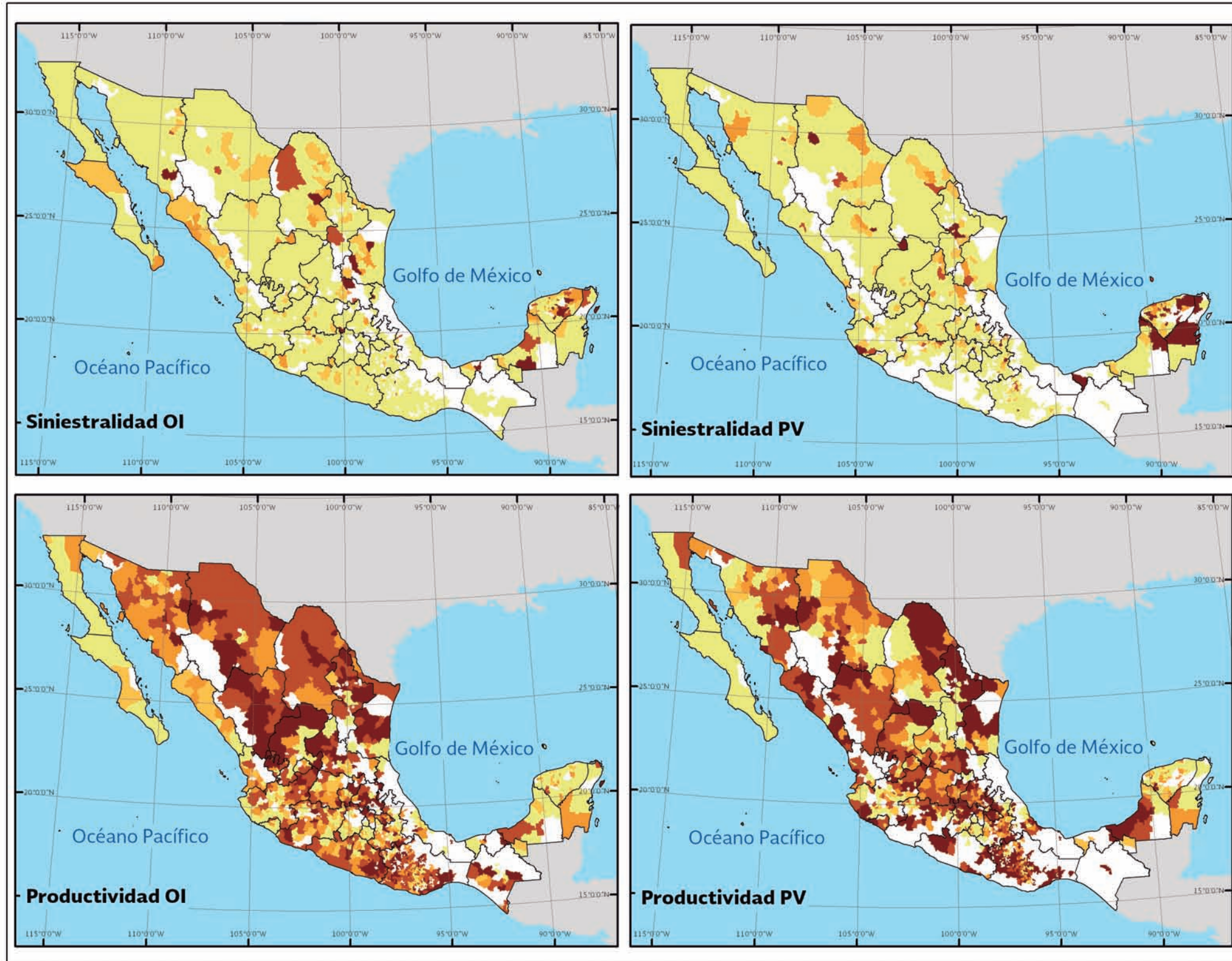
Elaboración propia con datos de SIAP (2009) y CRU para el periodo de referencia 1971 - 2000

0 150 300 600 900 1,200 Kilómetros

 Proyección: Cónica Conforme de Lambert

INDICADORES DE SENSIBILIDAD 4/5

Mapa 5.12

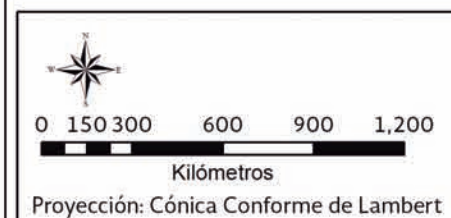


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Grado de vulnerabilidad [%]

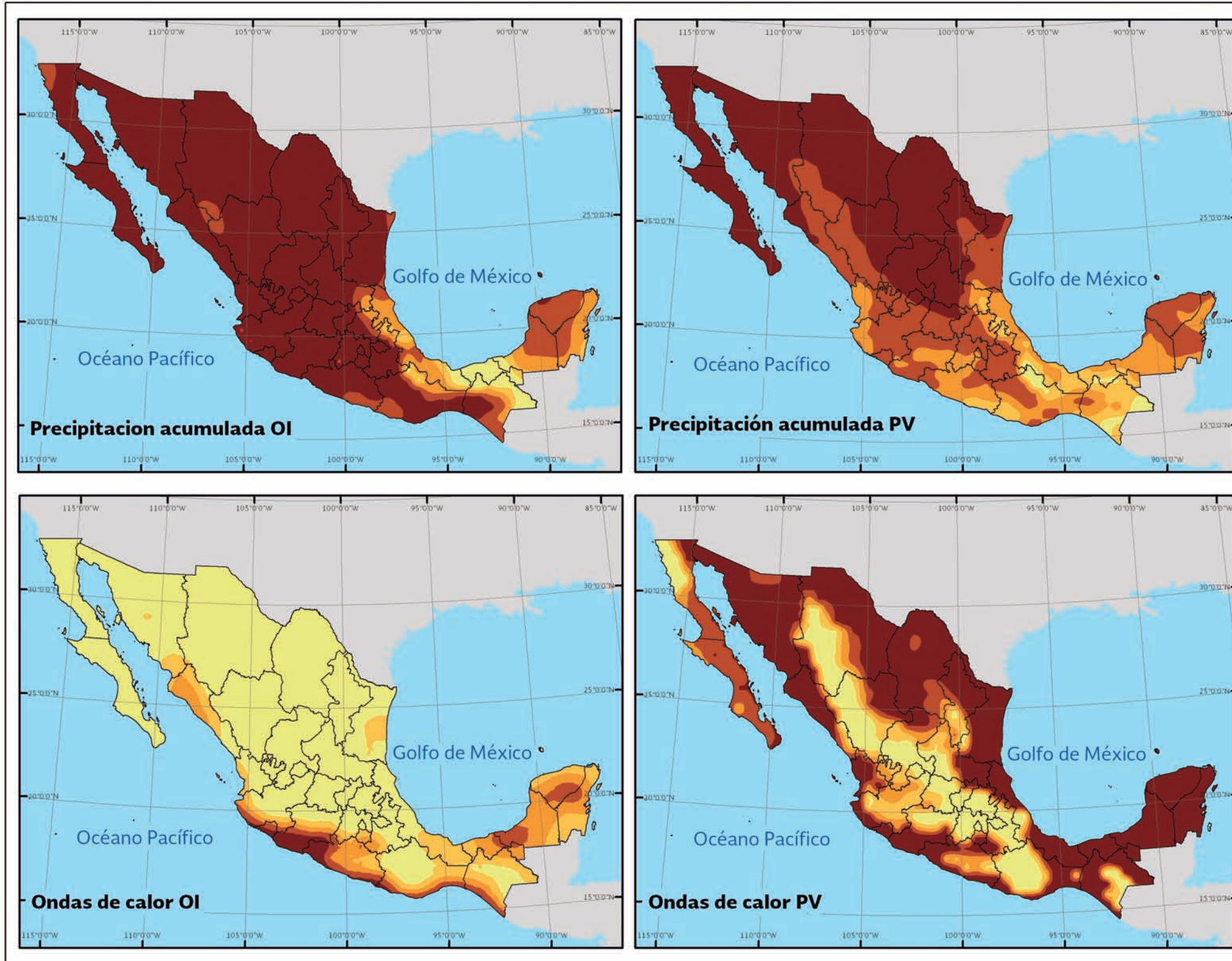
- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja
- Sin riego




Elaboración propia con datos de SIAP (2009)



INDICADORES DE SENSIBILIDAD 5/5

Mapa 5.13









Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

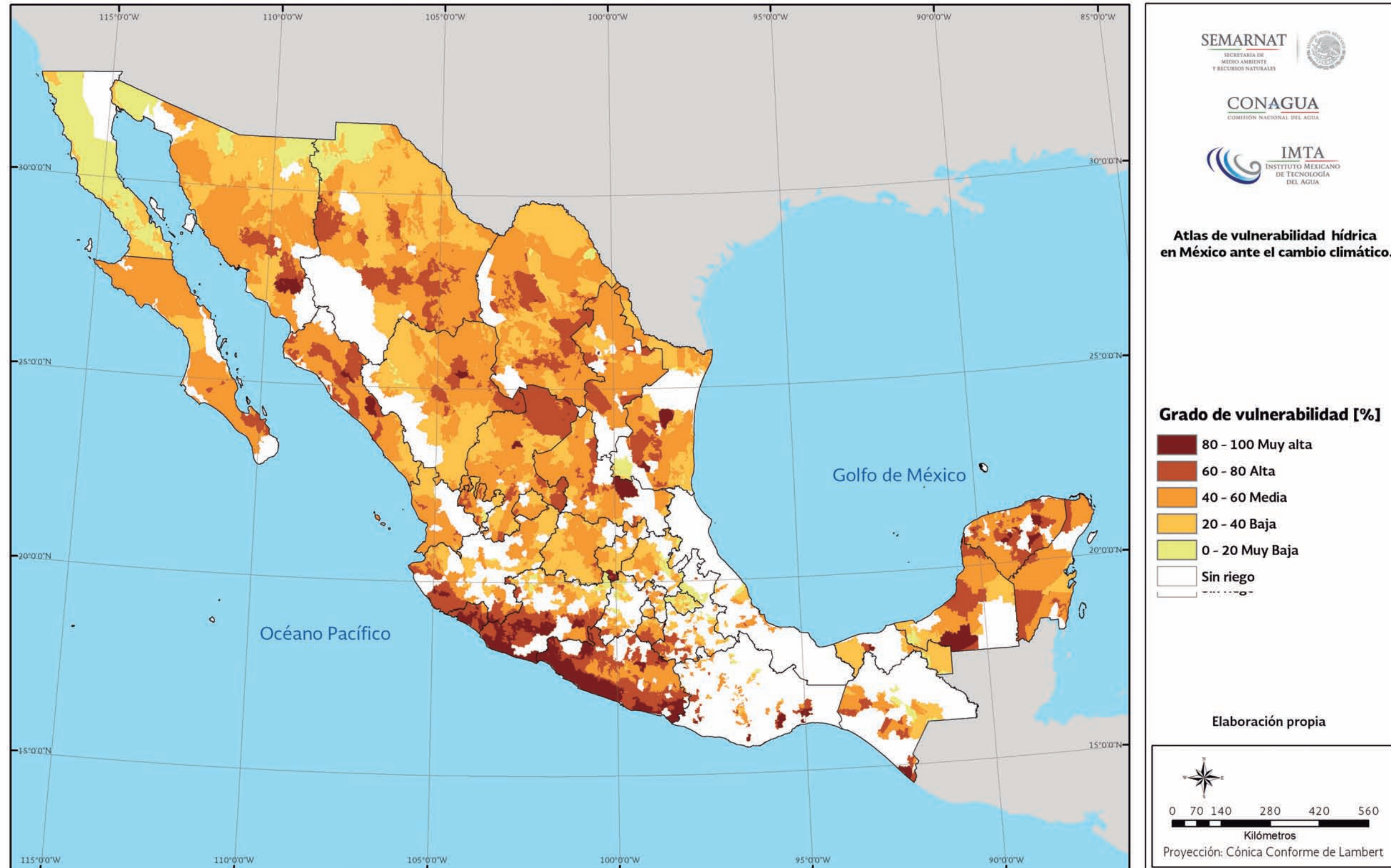
Elaboración propia con datos de CRU para el periodo de referencia 1971 - 2000

 0 162.5325 650 975 1,300
 Kilómetros
 Proyección: Cónica Conforme de Lambert

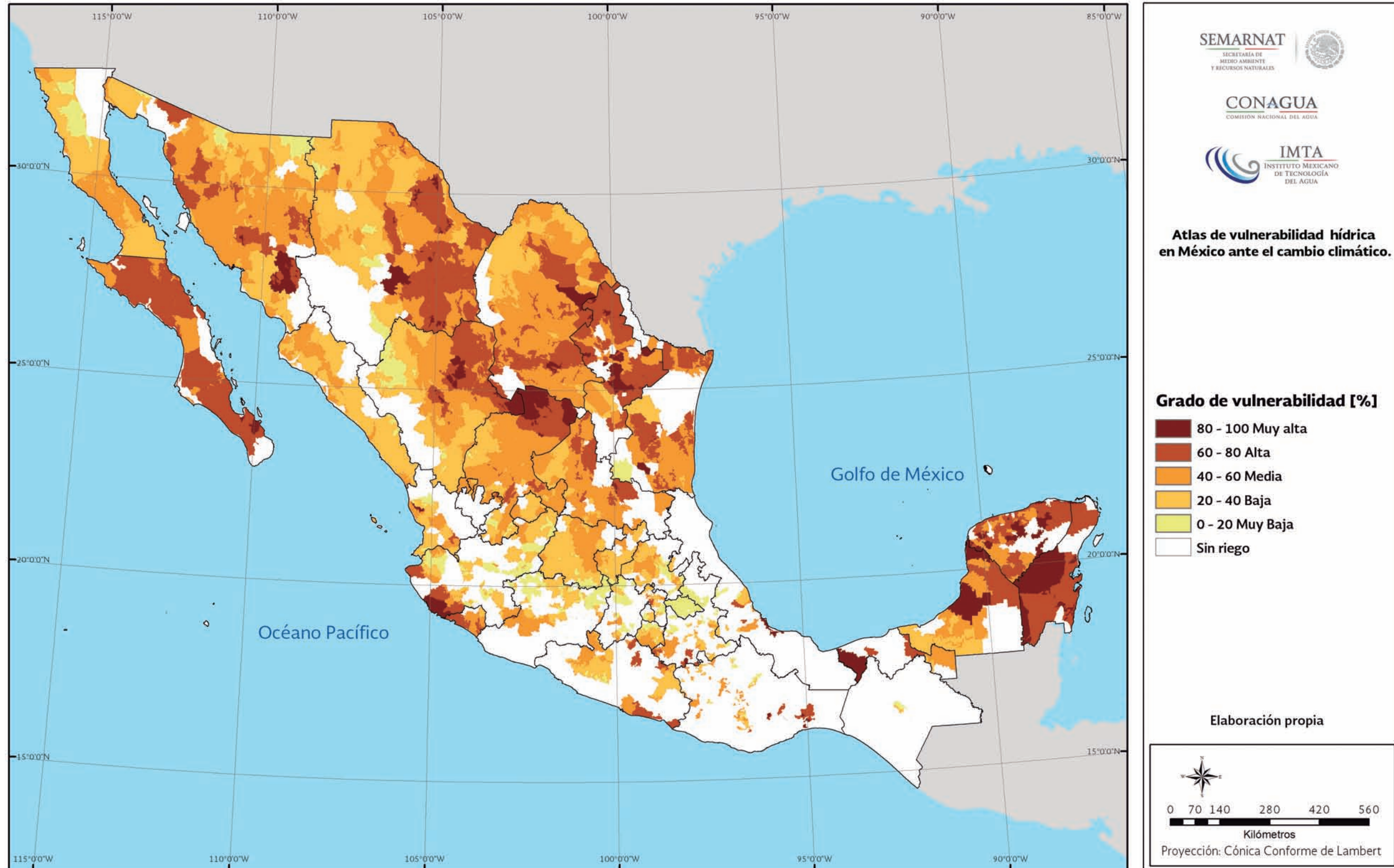
VULNERABILIDAD POR SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO CICLO OI 1/2

Mapa 5.14



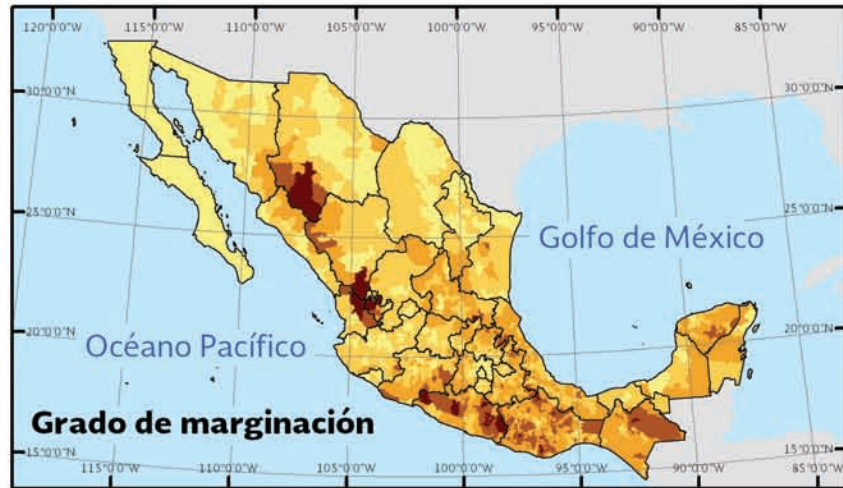
VULNERABILIDAD POR SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO CICLO PV 2/2

Mapa 5.15



INDICADORES DE CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN 1/2

Mapa 5.16

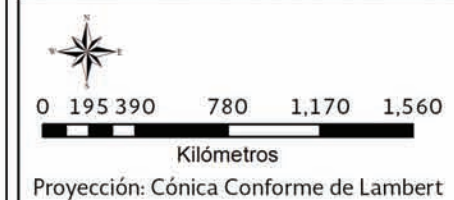


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

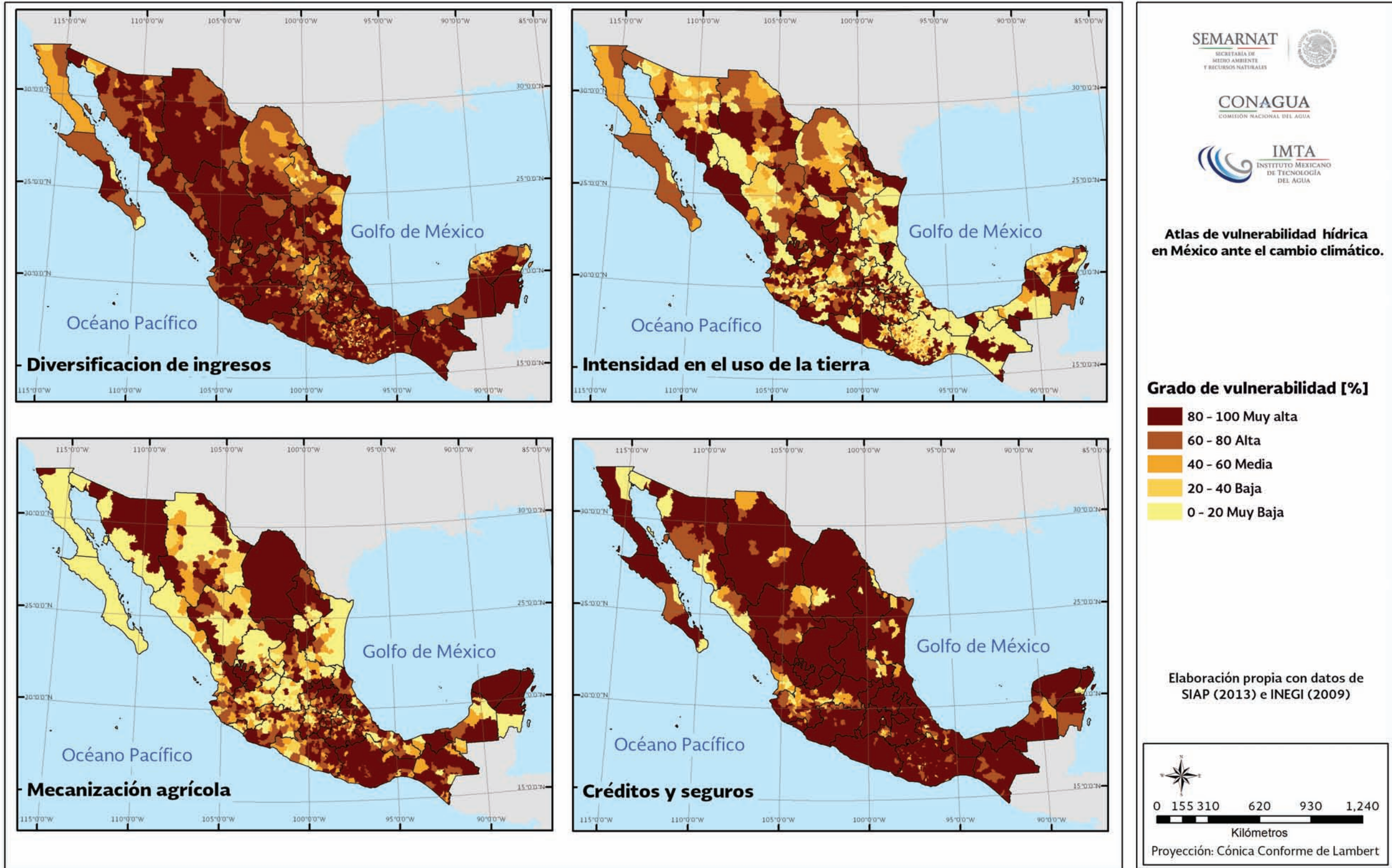
Grado de vulnerabilidad [%]

- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy Baja

Elaboración propia con datos de CONAPO (2010) e INEGI (2009)



INDICADORES DE CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN 2/2 Mapa 5.17

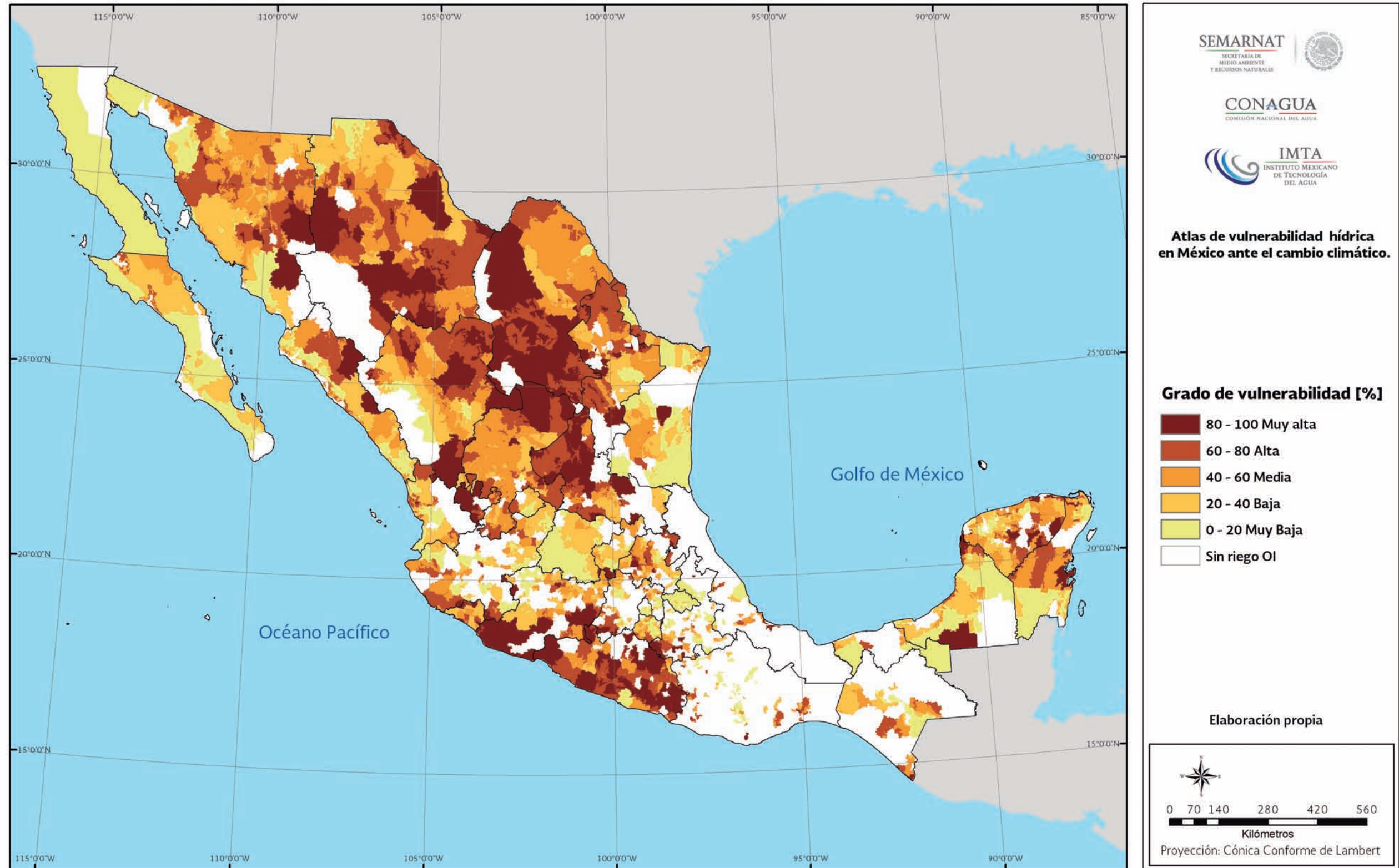


VULNERABILIDAD POR CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Mapa 5.18

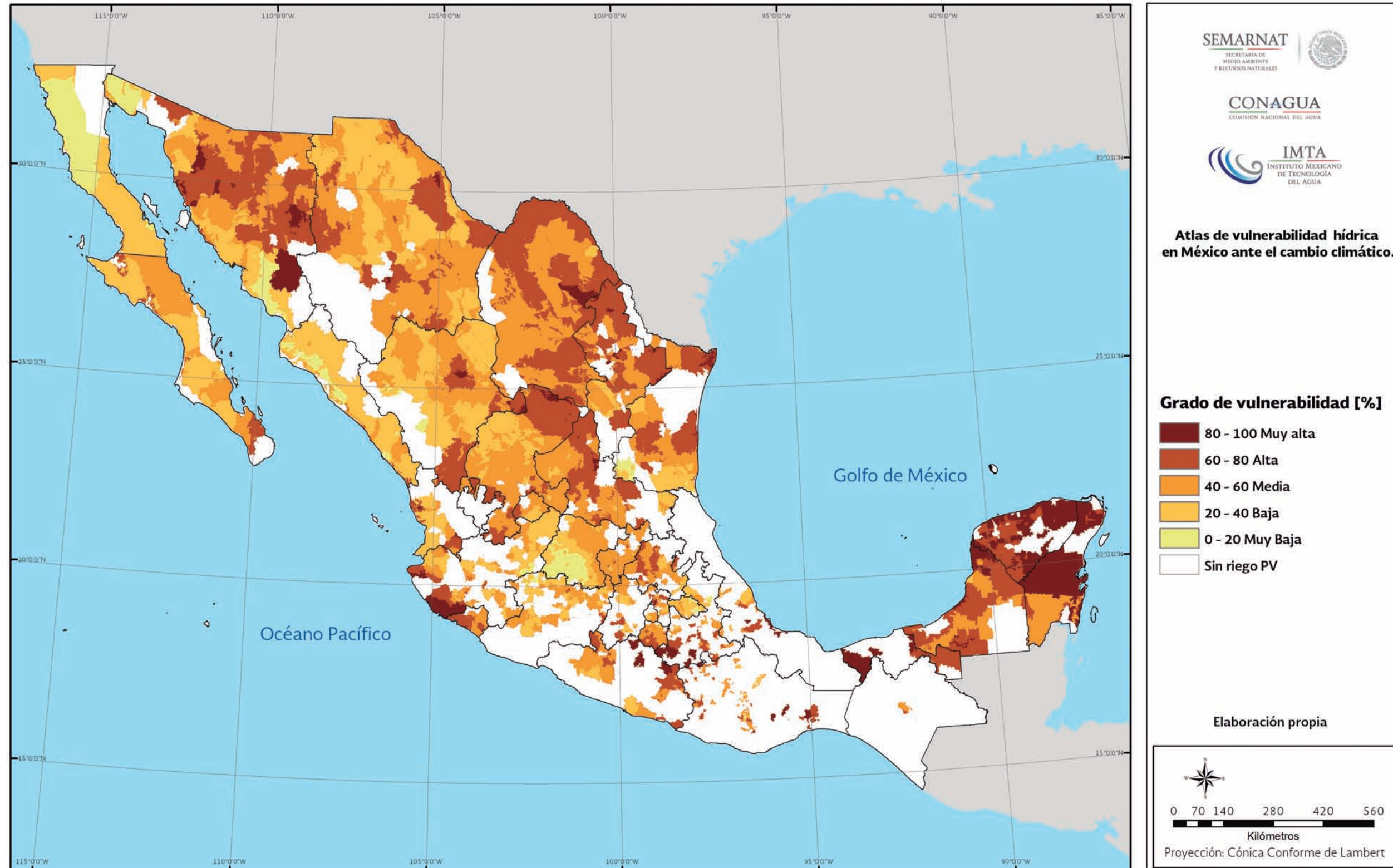


VULNERABILIDAD TOTAL AL CAMBIO CLIMÁTICO CICLO OI 1/2 Mapa 5.19



VULNERABILIDAD TOTAL AL CAMBIO CLIMÁTICO CICLO PV 2/2

Mapa 5.20



Vulnerabilidad de la agricultura de riego mexicana al cambio climático: actualización 2014

Cuadro 5.4 Vulnerabilidad global al cambio climático para el ciclo agrícola OI de los distritos de riego del país, expresada en % y clase de pertenencia.

Núm.	Distrito de riego	Entidad	Valor (%)	Clase
001	Pabellón	Ags.	48	MEDIA
002	Mante	Tam.	48	MEDIA
003	Tula	Hgo.	55	MEDIA
004	Don Martín	Coah.-NL	76	ALTA
005	Delicias	Chih.	70	ALTA
006	Palestina	Coah	67	ALTA
008	Metztlán	Hgo.	58	MEDIA
009	Valle de Juárez	Chih.	34	BAJA
010	Culiacán-Humaya	Sin.	60	MEDIA
011	Alto Río Lerma	Gto.	31	BAJA
013	Estado de Jalisco	Jal.	40	BAJA
014	Río Colorado	BC-Son.	11	MUY BAJA
016	Estado de Morelos	Mor.	54	MEDIA
017	Región Lagunera	Coah.-Dgo.	86	MUY ALTA
018	Colonias Yaquis	Son.	44	MEDIA
019	Tehuantepec	Oax.	44	MEDIA
020	Morelia	Mich.	40	BAJA
023	San Juan del Río	Qro.	50	MEDIA
024	Ciénega de Chapala	Mich.	21	BAJA
025	Bajo Río Bravo	Tam.	54	MEDIA
026	Bajo Río San Juan	Tam.	49	MEDIA
028	Tulancingo	Hgo.	35	BAJA
029	Xicotécatl	Tam.	40	BAJA
030	Valsequillo	Pue.	35	BAJA
031	Las Lajas	NL	40	BAJA
033	Estado de México	Mex.	47	MEDIA
034	Estado de Zacatecas	Zac.	60	MEDIA
035	La Antigua	Ver.	30	BAJA
037	Altar-Pitiquito-Caborca	Son.	51	MEDIA
038	Río Mayo	Son.	49	MEDIA
041	Río Yaquí	Son.	33	BAJA
042	Buenaventura	Chih.	64	ALTA
043	Estado de Nayarit	Nay.	49	MEDIA
044	Jilotepec	Méx.	40	BAJA
045	Tuxpan	Mich.	48	MEDIA
046	Cacahoatán-Suchiate	Chis.	20	MUY BAJA
048	Ticul	Yuc.	33	BAJA
049	Río Verde	SLP	50	MEDIA
050	Acuña-Falcón	Tam.	47	MEDIA
051	Costa de Hermosillo	Son.	53	MEDIA

052	Estado de Durango	Dgo.	68	ALTA
053	Estado de Colima	Col.	58	MEDIA
056	Atoyac-Zahuapan	Tlax.	20	MUY BAJA
057	Amuco-Cutzamala	Gro.	53	MEDIA
059	Río Blanco	Chis.	60	MEDIA
060	Pánuco (El Higo)	Ver.	36	BAJA
061	Zamora	Mich.	47	MEDIA
063	Guasave	Sin.	62	ALTA
066	Santo Domingo	BCS	54	MEDIA
068	Tepecoacuilco-Quechultenango	Gro.	27	BAJA
073	La Concepción	Méx.	12	MUY BAJA
074	Mocorito	Sin.	57	MEDIA
075	Río Fuerte	Sin.	58	MEDIA
076	Valle del Carrizo	Sin.	50	MEDIA
082	Río Blanco	Ver.	60	MEDIA
083	Papigochic	Chih.	90	MUY ALTA
084	Guaymas	Son.	40	BAJA
085	La Begoña	Gto.	40	BAJA
086	Río Soto La Marina	Tam.	52	MEDIA
087	Rosario-Mezquite	Mich.	38	BAJA
088	Chiconautla	Méx.	23	BAJA
089	El Carmen	Chih.	60	MEDIA
090	Bajo Río Conchos	Chih.	42	MEDIA
092A	Río Pánuco-U. Las Ánimas	Tam.	40	BAJA
092B	Río Pánuco-U. Chicayán	Ver	40	BAJA
092C	Río Pánuco-U. Pujal-Coy	SLP-Ver.	27	BAJA
093	Tomatlán	Jal.	27	BAJA
094	Jalisco Sur	Jal.	40	BAJA
095	Atoyac	Gro.	80	ALTA
096	Arroyozarco	Méx.	63	ALTA
097	Lázaro Cárdenas	Mich.	62	ALTA
098	José María Morelos	Mich. y Gro.	81	MUY ALTA
099	Quitupan-La Magdalena	Mich.	55	MEDIA
100	Alfajayucan	Hgo.	68	ALTA
101	Cuxtepeques	Chis.	55	MEDIA
102	Río Hondo	QR	40	BAJA
103	Río Florido	Chih.	86	MUY ALTA
104	Cuajinicuilapa	Gro.	80	ALTA
105	Nexpa	Gro.	65	ALTA
107	San Gregorio	Chis.	30	BAJA
108	Elota-Pixtla	Sin.	58	MEDIA

109	Río San Lorenzo	Sin.	52	MEDIA
110	Río Verde-Progreso	Oax.	90	MUY ALTA
111	Baluartes-Presidio	Sin.	44	MEDIA
112	Ajacuba	Hgo.	30	BAJA

Cuadro 5.5 Vulnerabilidad global al cambio climático para el ciclo agrícola OI de las unidades de riego del país agrupadas por entidad federativa, expresada en % y clase de pertenencia.

Entidad Federativa	Valor (%)	Clase	
1	Aguascalientes	55	MEDIA
2	Baja California	27	BAJA
3	Baja California Sur	51	MEDIA
4	Campeche	42	MEDIA
5	Chiapas	74	ALTA
6	Chihuahua	72	ALTA
7	Coahuila de Zaragoza	68	ALTA
8	Colima	70	ALTA
9	Distrito Federal	45	MEDIA
10	Durango	71	ALTA
11	Guanajuato	47	MEDIA
12	Guerrero	75	ALTA
13	Hidalgo	61	ALTA
14	Jalisco	58	MEDIA
15	México	55	MEDIA
16	Michoacán	68	ALTA
17	Morelos	55	MEDIA
18	Nayarit	52	MEDIA
19	Nuevo León	65	ALTA
20	Oaxaca	47	MEDIA
21	Puebla	50	MEDIA
22	Querétaro	60	MEDIA
23	Quintana Roo	56	MEDIA
24	San Luis Potosí	74	ALTA
25	Sinaloa	55	MEDIA
26	Sonora	62	ALTA
27	Tabasco	30	BAJA
28	Tamaulipas	53	MEDIA
29	Tlaxcala	35	BAJA
30	Veracruz de Ignacio de la Llave	46	MEDIA
31	Yucatán	56	MEDIA
32	Zacatecas	67	ALTA

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas agrícolas son ecosistemas antropogénicos en continua evolución que responden a cambios no sólo climáticos sino también socioeconómicos e institucionales relacionados con el proceso productivo. Estimar la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático es una tarea difícil debido a la incertidumbre de las proyecciones climáticas, la dificultad para caracterizar la agricultura actual y la incertidumbre en las respuestas adaptativas, planificadas o autónomas que los agricultores e instituciones gubernamentales promuevan e implanten en el futuro.

En este estudio se estimó la vulnerabilidad de los distritos y unidades de riego del país usando índices normalizados para el ciclo otoño-invierno bajo el escenario de emisiones RCP8.5 para fines de siglo. Dicha estimación puede ser de utilidad para priorizar las zonas de riego y aplicar medidas de adaptación planificadas.

La precisión de los datos socioeconómicos y productivos utilizados no permite capturar las diferencias entre productores y zonas agrícolas que pudieran presentarse al interior de los municipios con gran extensión territorial. Tampoco capturan la dinámica actual de la capacidad de adaptación y sensibilidad de las regiones agrícolas. Sin embargo, los mapas de vulnerabilidad generados ayudan a identificar las grandes zonas más susceptibles de afectación por cambio climático y donde las políticas públicas deben dirigir sus acciones para optimizar los recursos y priorizar las áreas de intervención. Los resultados indican que las zonas agrícolas más vulnerables no necesariamente son las zonas con el mayor impacto por exposición al cambio climático, sino las zonas marginadas con baja capacidad de adaptación.

La estimación de la vulnerabilidad se realizó, en su mayoría, considerando la información en el ámbito de municipios disponible en México a partir de fuentes nacionales e internacionales. Varios indicadores no estaban desglosados por modalidad de agricultura, por lo que los mapas generados indican valores promedio tanto para agricultura de riego como de temporal. Existe una necesidad recurrente de actualizar los estudios de cambio climático ante el mejor conocimiento de la dinámica de la atmósfera y de los datos disponibles. No obstante, la estimación de la vulnerabilidad agrícola sigue siendo limitada por la disponibilidad, oportunidad y confiabilidad de datos biofísicos y socioeconómicos de las regiones agrícolas del país.

REFERENCIAS

Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto, A. C. Conde, I. Quintanar, J. S. Santana, R. Romero, M. E. Maya, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala, H. Carrillo, O. Santiesteban y M. E. Bravo (2013), *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional*, informe final del

Proyecto al INECC, 150 pp. Disponible en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

CENAPRED (2013), *Base de datos de eventos catastróficos*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, DF.

CONAGUA (2009), *Características de acuíferos de país: datos vectoriales y base de datos*, Comisión Nacional de Agua, México, DF.

_____ (2010), *Estadísticas del agua en México*, Comisión Nacional de Agua, México, DF, 249 pp.

_____ (2013), *Estadísticas de producción agrícola de los distritos de riego*, Comisión Nacional de Agua, Gerencia de Distritos de Riego, México, DF.

CONAPO (2010), *Índices de marginación*, Consejo Nacional de Población, base de datos. Mexico, DF.

CRISIS (2010), *Sea Level Rise Maps*, Center for Remote Sensing of Ice Sheets, University of Kansas, USA. Disponible en línea, <http://www.crisis.ku.edu/data/sea-level-rise-maps>

FAO (1999), *Cultivating Our Futures*, Documento expositivo: El carácter multifuncional de la agricultura y la tierra, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, documento preparado para la Conferencia FAO/Países Bajos sobre el Carácter Multifuncional de la Agricultura y la Tierra, 12-16 de septiembre de 1999. Maastricht, Países Bajos.

Gadgil, D. (1995), "Climate Change and Agriculture: An Indian perspective", *Current Science*, 9:649-659.

Gbetibouo, G. A. and C. Ringler (2009), *Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability: A Subnational Assessment*, IFPRI Discussion Paper 00885, International Food Policy Research Institute, Environment and Production Technology Division, Washington, D. C., 30 pp.

Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. and Lister, D. H (2014), "Updated High-resolution Grids of Monthly Climatic Observations - The CRU TS3.10 dataset", *International Journal of Climatology*, 34(3): 623-642.

Hodson, D. P., E. Martínez-Romero, J. W. White, J. D. Corbett, and M. Bänziger (2002), *Latin America Maize Research Atlas* (v. 1.0), México DF: CIMMYT, CD.

INEGI (1998), *Datos vectoriales edafológicos 1:250,000*, Aguascalientes.

_____ (2009), *Censo agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal, Estados Unidos Mexicanos, Aguascalientes*.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001), *Impacts, Adaptation, and Vulnerability Climate Change 2001*, Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge, UK, University Press.

_____ (2007), *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*, en: Pachauri, R. K., and A. Reisinger (eds.), *Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*, Ginebra, pp. 104.

Iyengar, N. S. and P. Sudarshan (1982), "A Method of Classifying Regions from Multivariate Data", *Economic and Political Weekly*, Special Article: 2048-52.

Loucks, D. P, and Van Beek, E. (2005), *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications, Studies and Reports in Hydrology*, UNESCO, Publ. 680 pp.

Magurran, A. E. (1988), *Ecological Diversity and its Measurement*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, pp 192.

Montero Martínez, J. M., Ojeda Bustamante, W., Santana Sepúlveda, J. S., Prieto González, R. y Lobato Sánchez, R. (2013), "Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México", *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV (2):113-128.

Moss, R.H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. Vuuren, Carter, T.R., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. y Wilbanks, T.J. (2010), "The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment", *Nature*, 463:747-756.

Ojeda, W., P. Martínez, y L. Hernández (2008), "Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego", en: P. Martínez y A. Aguilar (eds.), *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*, vol. II, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 73-83.

Ojeda Bustamante, W., M. Íñiguez Covarrubias, J. M. González Camacho (2010), Capítulo 5 "Vulnerabilidad de la agricultura de riego de México ante el cambio climático", en: P. Martínez, y C. Patiño (eds.), *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 115-142.

Prieto, R., M. E. Maya, J. G. Rosario de la Cruz, C. Sánchez (2014), Capítulo 3 "Riesgo municipal por época de lluvias y ciclones tropicales en México y proyecciones bajo escenarios de cambio climático", en: *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Salinas, J.A., G. Colorado, M. E. Maya (2014), Capítulo 2 "Escenarios de cambio climático para México", en: *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2013), Información estadística agrícola con desagregación geográfica de acuerdo en nivel Distrito de Desarrollo Rural (DDR) (1999-2011) y nivel municipal (2003-2011). Disponible en línea en el portal del SIAP: <http://www.siap.gob.mx/>

Trabucco, A., and Zomer, R.J. (2009), Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET): Geospatial Database, CGIAR Consortium for Spatial. Disponible en línea: <http://www.csi.cgiar.org>.

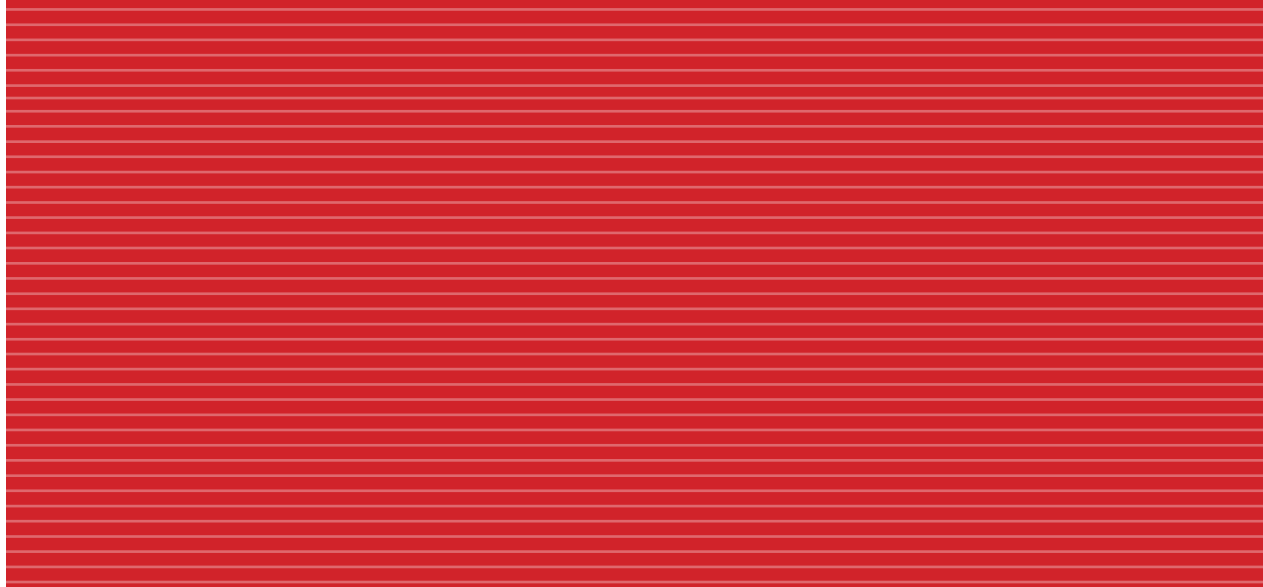
Vincent, K. (2004), *Creating an Index of Social Vulnerability to Climate Change for Africa*, Working Paper 56, Norwich, UK, Tydall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia.

Yusuf A. A. and Francisco, H. A. (2009), *Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia*, Special and Technical Paper tp200901s1, Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA), p. 26. Disponible en línea, <http://www.eepsea.org>.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la participación de Eduardo Celis Lais, que elaboró los mapas digitales. A Juan Bahena Sánchez, Anastasio Toledo Estrada y César Ricardo Minauro Cervera que realizaron los cálculos para estimar los valores espaciales de los indicadores de vulnerabilidad. También se agradece a María Eugenia Maya Magaña por su apoyo en la integración de la base climática utilizada.





CAPÍTULO 6

ÍNDICE DE RIESGO EN LA CALIDAD DEL AGUA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

Norma Ramírez Salinas, Camilo Vázquez Bustos y María Eugenia Maya Magaña





INTRODUCCIÓN

El efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos es una de las principales preocupaciones alrededor del mundo. México, por su ubicación geográfica y condiciones socioeconómicas, es especialmente vulnerable al calentamiento global, ya que sufrirá notables modificaciones en su ciclo hidrológico (Martínez, 2008). Esta situación afectará, en consecuencia, la disponibilidad, demanda y calidad del agua, así como el manejo de las fuentes de abastecimiento.

En este marco, el presente capítulo tiene como objetivo proponer un conjunto de directrices y un método para identificar problemas potenciales y posibles efectos en la calidad del agua para priorizarlos y poder concentrar los recursos en una gestión del riesgo (planes de prevención, supervisión y respuesta).

La gestión del riesgo climático se centra en el desarrollo de sectores que, como la agricultura, recursos hídricos, seguridad alimentaria, salud, medio ambiente y medios de subsistencia son muy sensibles al cambio y a la variabilidad del clima (PNUD, 2010). El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, la gestión y prevención de los riesgos climáticos implica no sólo el replanteamiento de las vías de desarrollo, políticas y marcos institucionales tradicionales, sino también el fortalecimiento de las capacidades locales, nacionales y regionales para diseñar e implementar medidas de gestión de riesgos, mediante la coordinación de una amplia gama de actores.

Lo anterior requiere determinar un índice de riesgo para evaluar la afectación de la calidad del agua que, de acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (CEPAL-BID), considera los elementos especificados en el cuadro 6.1.

Cuadro 6.1. Elementos para la determinación del riesgo.
Fuente: CEPAL-BID, 2000.

Amenaza	Vulnerabilidad	Riesgo
Fenómenos naturales 1) Probabilidad de que ocurra un evento, en espacio y tiempo z determinados, con suficiente intensidad como para producir daños 2) Probabilidad de ser detectada para ser mitigada	Grados de exposición y fragilidad, valor económico Probabilidad de que, debido a la intensidad del evento y a la fragilidad de los elementos expuestos, ocurran daños en la economía, la vida humana y el ambiente	f (A, V) Probabilidad combinada entre los parámetros amenaza (A) y vulnerabilidad (V)

Adaptación propia.

En el cuadro 6.1 se observa que el riesgo es la probabilidad combinada entre los parámetros amenaza y vulnerabilidad. Sin embargo, es necesario introducir un elemento que determine la probabilidad de que la calidad del agua que no cumpla con los criterios de la normatividad aplicable (falla) sea detectada para ser mitigada antes de que el agua llegue al usuario final. Una vez obtenida la probabilidad combinada, se tendrá como resultado un índice de riesgo que deberá ser gestionado.

OBJETIVO

Proponer un conjunto de directrices y un método para identificar problemas potenciales y posibles efectos en la calidad del agua por el cambio climático, para priorizarlos y poder concentrar los recursos en una gestión del riesgo

METODOLOGÍA

DETERMINAR EL ÍNDICE DE RIESGO EN LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

Ello requiere asignar un grado de amenaza y uno de vulnerabilidad:

GRADO DE AMENAZA

Probabilidad de que ocurra un evento, en espacio y tiempo determinado, con suficiente intensidad como para producir daño (Landa *et al.*, 2008). Al respecto, la calidad del agua se relaciona con los escenarios de incremento de temperatura ambiente (Salinas *et al.*, 2014), debido a que ésta tiene una fuerte correlación con la temperatura del agua y los procesos fisicoquímicos, teniendo impactos significativos en su calidad (IMTA, 2011).

OCURRENCIA

Probabilidad de que una manifestación del cambio climático pudiera presentar en la calidad del agua un cambio por incremento de temperatura, y ésta será calificada de acuerdo con los antecedentes o factores que intervienen en los sistemas y servicios urbanos vulnerables evaluados.

En el cuadro 6.2 se muestra una lista de calificación a las diferentes ocurrencias esperadas, con respecto a la variación de temperatura proyectada.



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Cuadro 6.2. Calificación de la ocurrencia.

Ocurrencia		
Índice	Probabilidad	Calificación
Muy alto	100% probable	1.0
	Muy alta: manifestaciones persistentes y peligrosas	0.9
Alto	Muy alta: peligroso con advertencia.	0.8
	Alta: manifestaciones frecuentes	0.7
Medio	Moderadamente alta	0.6
	Moderada: manifestaciones ocasionales	0.5
Bajo	Baja	0.4
	Moderadamente baja: relativamente pocas manifestaciones	0.3
Muy bajo	Remota: la manifestación es improbable	0.2
	Muy remota: improbable	0.1

Adaptación propia.

Cuadro 6.3. Calificación del grado de detección.

Detección	Criterio	Tipo de control	Método de detección	Calificación
Casi imposible	Certeza absoluta de no medición	C	No existe	1.0
Muy remota	Los controles probablemente no lo detectan	C	Control con monitoreo indirecto o aleatorio	0.9
Remota	Los controles tienen poca probabilidad de detectar	C	Control sólo con inspección visual	0.8
Muy bajo		C	Control sólo con doble inspección visual	0.7
Bajo		B	Control con métodos gráficos	0.6
Moderado		B	Control basado en medición de variables	0.5
Altamente moderado	Los controles pueden detectar	B	Control de calidad en los datos	0.4
Alta		B	Control de calidad en los datos y análisis estadístico de los mismos	0.3
Muy alta	Los controles tienen casi la certeza de detectar	B	Control de calidad, análisis estadístico y criterios de homogeneidad de los datos	0.2
Excelente	Los controles tienen la certeza de detectar	A	Un sistema permanente de administración y mantenimiento de los metadatos	0.1

Tipo de control: A: Administración de metadatos, B: Análisis estadístico de los datos, C: Interpretación sin datos. Fuente: elaboración propia.

GRADO DE DETECCIÓN

Una vez asignado el valor de la ocurrencia, asignar el grado de detección, que define la probabilidad de que la falla sea descubierta antes de que llegue al usuario final. La detección del cambio climático es el proceso que muestra que el clima ha cambiado en algún sentido definido estadísticamente, sin tener que aportar una razón para explicar dicho cambio (IPCC, 2008).

Una manera de detectar los impactos de cambio climático en la calidad del agua es identificando tendencias de incremento en la temperatura del agua con respecto al tiempo, además del monitoreo constante y periódico de algunos parámetros importantes como son pH, oxígeno disuelto, ORP, etcétera.

En el cuadro 6.3 se proponen criterios de evaluación que van de una calificación de la detección del 0.1 al 1.0, dependiendo del grado de eficiencia en la generación y administración de la información obtenida por monitoreo periódico.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL

Los efectos del cambio climático son potencialmente más significativos para la población pobre en los países en vías de desarrollo que para los habitantes de las naciones desarrolladas, debido a su mayor sensibilidad a la exposición a variables climáticas y a su menor capacidad de resiliencia (Soares *et al.*, 2012).

Para la asignación de valores en este elemento, se consideraron los índices de vulnerabilidad social (IVS) expuestos en el capítulo 1 "Conceptualización de vulnerabilidad y construcción de un Índice de Vulnerabilidad Social" del presente libro, por lo que los subelementos valorados son: salud, educación, vivienda,

Cuadro 6.4. Calificación de la condición de vulnerabilidad social.

Condición de vulnerabilidad social	Calificación
Muy Alta	1.00 y más
Alta	0.80
Media	0.60
Baja	0.40
Muy Baja	0.20

empleo e ingreso y población. En el cuadro 6.4 se muestra la calificación de la condición de vulnerabilidad social.

ÍNDICE DE RIESGO DE CALIDAD DEL AGUA

Una vez valorados los elementos ocurrencia (que están en función del incremento de temperatura de cada uno de los tres escenarios posibles: RCP 4.5, 6.0 y 8.5), detección (amenaza) y el índice de vulnerabilidad social (severidad), obtener la probabilidad combinada. En todos los casos, considerar un IVS constante; es decir, sin variaciones en los subelementos salud, educación, vivienda, empleo e ingreso y población. El resultado será un índice de riesgo de calidad del agua ante el cambio climático para cada estado.

MAPAS DE RIESGO

Para elaborar los mapas se agruparon los valores obtenidos del índice de riesgo (probabilidad combinada) en cinco grupos determinados por su grado de riesgo: "Muy bajo", "Bajo", "Medio", "Alto" y "Muy alto". Los mapas presentan escenarios posibles para los periodos (2015-2039) y (2075-2099) RCP 4.5, 6.0 y 8.5 para los 31 estados y el Distrito Federal.

RESULTADOS

Una vez calculado el índice de riesgo conforme a la metodología, los escenarios evaluados fueron en los periodos 2015-2039 para los RCP 4.5, 6.0 y 8.5 (véase capítulo 2 "Escenarios de cambio climático para México" del presente libro), mapas 6.1, 6.2 y 6.3; 2075-2099 para los RCP 4.5, 6.0 y 8.5, mapas 6.4, 6.5 y 6.6, respectivamente. Los mapas 6.7, 6.8 y 6.9 corresponden al periodo 2075-2099, donde se consideró una medida de adaptación: "Fortalecer la detección de tal manera que los controles puedan detectar las variaciones de calidad del agua", por medio de un control de calidad en los datos generados.

La interpretación para cada uno de los escenarios se presenta a continuación:

PERIODO (2015-2039)

Podemos observar cómo los estados de Chihuahua y Coahuila, en los mapas 6.1, 6.2 y 6.3 son los que presentan una vulnerabilidad mayor con respecto al

resto del país, así como también el estado de Sonora en el mapa 6.2. Esto debido, principalmente, al aumento de temperatura en esa zona. Los estados de Chiapas y Guerrero también figuran, pero debido a que presentan un IVS mayor con respecto a los demás estados.

PERIODO (2075-2099)

Se presenta para la mayoría de los estados un Índice de riesgo de “Medio” a “Muy alto” (mapas 6.4, 6.5 y 6.6). El principal factor es un incremento en la temperatura que eleva

la calificación de la ocurrencia; esto es, una mayor probabilidad de manifestaciones fuertes y peligrosas, aunada a un IVS alto en los estados del sur del país.

Los estados de Baja California y Baja California Sur, así como el Distrito Federal presentan, en todos los casos, los menores índices de riesgo debido a un bajo IVS (mayor capacidad de resiliencia).

En los mapas 6.7 al 6.9 se consideró la introducción de una medida de adaptación (implementar una detección por medio de un control de calidad en los datos), lo

cual da como resultado una mejora en el índice de riesgo.

El índice de riesgo en todo el país disminuye con respecto al periodo (2075-2099), presentando riesgo de “Muy bajo” a “Bajo” debido al fortalecimiento de la detección, ya que ayuda a la prevención del riesgo.

Es necesario hacer hincapié en que los mapas presentan, de manera general, un índice de riesgo por estado, sin olvidar que existe una distribución heterogénea de índice de vulnerabilidad por municipio.



ÍNDICE DE RIESGO, 2015-2039 RCP4.5

Mapa 6.1



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo
- Entidad federativa

Fuente: Elaboración propia, periodo 2015-2039. RCP4.5



0 75 150 300 450 600

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ÍNDICE DE RIESGO, 2015-2039 RCP6.0

Mapa 6.2



ÍNDICE DE RIESGO, 2015-2039 RCP8.5

Mapa 6.3



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo
- Entidad federativa

Fuente: Elaboración propia, periodo 2015-2039. RCP8.5



0 75 150 300 450 600

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ÍNDICE DE RIESGO, 2075-2099 RCP4.5

Mapa 6.4



ÍNDICE DE RIESGO, 2075-2099 RCP6.0

Mapa 6.5



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo
- Entidad federativa

Fuente: Elaboración propia, periodo 2075-2099. RCP6.0



0 75 150 300 450 600

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ÍNDICE DE RIESGO, 2075-2099 RCP8.5

Mapa 6.6



ÍNDICE DE RIESGO CON ADAPTACIÓN, RCP4.5

Mapa 6.7



Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

- Índice**
- Muy Alto
 - Alto
 - Medio
 - Bajo
 - Muy Bajo
 - Entidad federativa

Fuente: Elaboración propia, periodo 2075-2099. RCP4.5 considerando el elemento "Detección de calidad del agua" como altamente moderado.



0 75 150 300 450 600

Kilómetros

Proyección: Cónica Conforme de Lambert

ÍNDICE DE RIESGO CON ADAPTACIÓN, RCP6.0

Mapa 6.8

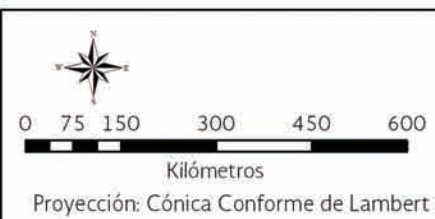


Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático.

Índice

- Muy Alto
- Alto
- Medio
- Bajo
- Muy Bajo
- Entidad federativa

Fuente: Elaboración propia, periodo 2075-2099. RCP6.0 considerando el elemento "Detección de calidad del agua" como altamente moderado.



ÍNDICE DE RIESGO CON ADAPTACIÓN, RCP8.5

Mapa 6.9



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con el análisis de la información obtenida de la aplicación de la metodología para la determinación de un índice de riesgo estatal sobre la calidad del agua ante el cambio climático, se puede decir que existe un alto riesgo para los estados del noroeste del país, ya que presentan los incrementos mayores de temperatura, acordes con los nuevos escenarios, así como los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas por presentar los IVS más elevados.

La baja capacidad de detección eleva el índice de riesgo en todos los casos, lo que hace necesario fomentar el monitoreo de los cuerpos de agua, analizar los datos y lograr que el análisis se efectúe con un enfoque de gestión del riesgo.

Es recomendable, una vez determinado un índice de riesgo, priorizar los modos de falla y realizar acciones para eliminar o reducir el riesgo. Posteriormente, actualizar el índice de riesgo para revisar si éste ha disminuido o se ha eliminado.

El índice de riesgo cuenta con ciertas características:

- Es mutable con el tiempo: cambia de acuerdo con las acciones realizadas o no realizadas; jamás permanece constante.
- Es sectorial: cada sector deberá ser analizado de manera particular, ya que cada uno presenta características intrínsecas.
- Es administrable: obtener un índice de riesgo obliga a administrarlo y crear la cultura de la gestión del riesgo, proporcionando beneficios como identificar fallas o defectos antes de que estos ocurran, reducir los costos, incrementar la confiabilidad del sistema evaluado y administrado, documentar los conocimientos y mantener la mejora continua.

Un índice de riesgo para uso ambiental deberá determinarse considerando las características propias de un sistema ambiental.

Es importante tener en cuenta la introducción de medidas de adaptación que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático en la calidad del agua, principalmente en la que será para el consumo humano.

REFERENCIAS

- CEPAL-BID, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2000), *Un tema del desarrollo: la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres*, documento presentado en el Seminario Enfrentando Desastres Naturales: Una Cuestión del Desarrollo.
- IMTA (2011), *Impacto del cambio climático en la calidad del agua en México*, Jiutepec, Morelos, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IPCC (2008), *Cambio climático 2007*, Ginebra.
- Landa, R., Magaña, V., y Neri, C. (2008), *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*, Semarnat, México.
- PNUD. (2010), *Índice de desarrollo humano municipal en México*.
- Salinas, José Antonio et al. (2014), *Actualización de escenarios de cambio climático para México*.
- Soares Moraes, D., y Vargas Velázquez, S. (2012), *Capitales comunitarios y vulnerabilidad social frente al cambio climático en un municipio de Yucatán*, Trayectorias, 51-75.

AGRADECIMIENTOS

A Denise Soares, Roberto Romero y Ricardo López por su apoyo con la información del Índice de Vulnerabilidad Social, y a José Antonio Salinas Prieto y Gabriela Colorado Ruiz, por el apoyo con la información para determinar la ocurrencia por medio de los escenarios climáticos.



El libro *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México*, se terminó de imprimir el mes de diciembre en los talleres de Impresión y Diseño, Calle Suiza, número exterior 23 Bis, Colonia Portales, Del. Benito Juárez, DF. El tiraje consta de 500 ejemplares.

