

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE MÉXICO. VOLUMEN III

# ATLAS DE VULNERABILIDAD HÍDRICA EN MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO



GOBIERNO  
FEDERAL

MÉXICO  
2010

SEMARNAT



EDITORES:

• POLIOPTRO F. MARTÍNEZ AUSTRIA • CARLOS PATIÑO GÓMEZ



Vivir Mejor



Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III

# Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editores:

• Polioptro F. Martínez Austria • Carlos Patiño Gómez

Noviembre de 2010

[www.imta.gob.mx](http://www.imta.gob.mx)

551.48 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
165 Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. / coordinadores generales Polioptro F. Martínez Austria y Carlos Patiño Gómez. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2010.  
164 pp. ; 28 x 43 cm  
ISBN: 978-607-7563-23-5

1. Cambio climático 2. Vulnerabilidad hídrica 3. Seguridad hídrica 4. Gestión de riesgos

**Coordinación editorial:**

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Coordinación de Comunicación, Participación e Información  
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización y Servicios Editoriales

Primera edición; 2010.

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso,  
Jiutepec, Morelos  
C.P. 62550

ISBN: 978-607-7563-23-5

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, del editor.

Impreso en México – *Printed in Mexico*

# Contenido

<b>Presentación</b> . . . . .	7
<b>Capítulo 1</b>	
Índice de vulnerabilidad social . . . . .	9
<i>Denise Soares, Roberto Romero y Ricardo López</i>	
<b>Capítulo 2</b>	
Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperaturas máxima y mínima . . . . .	39
<i>Martín José Montero Martínez, Jessica Martínez Jiménez, Nadia Itzel Castillo Pérez y Brisia Edit Espinoza Tamarindo</i>	
<b>Capítulo 3</b>	
Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México . . . . .	65
<i>Ricardo Prieto González, Roberto Ramírez Villa, Virginia Edith Cortés Hernández y María Eugenia Maya Magaña</i>	
<b>Capítulo 4</b>	
Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales . . . . .	81
<i>Iván Rivas Acosta, Alberto Güitrón de los Reyes y Héctor Alonso Ballinas González</i>	
<b>Capítulo 5</b>	
Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático . . . . .	115
<i>Waldo Ojeda Bustamante, Mauro Íñiguez Covarrubias y Juan Manuel González Camacho</i>	
<b>Capítulo 6</b>	
Calidad del agua . . . . .	143
<i>Antonio Javier García López, Norma Ramírez Salinas, Camilo Vázquez Bustos y Gabriela E. Moeller Chávez</i>	



# Presentación

**E**l cambio climático es el fenómeno ambiental que mayor relevancia ha alcanzado en los últimos años a causa de sus posibles consecuencias, muchas de ellas irreversibles.

Se considera que la población de escasos recursos de los países en vías de desarrollo será la que sufrirá los efectos más negativos debido a su mayor vulnerabilidad.

Ante este escenario, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y en congruencia con lo establecido por el Gobierno Federal en el eje rector Sustentabilidad Ambiental del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 y en el Programa Especial de Cambio Climático 2009, ha impulsado el estudio de los efectos de este fenómeno en la disponibilidad de los recursos hídricos, en la sociedad, en la calidad del agua y en la agricultura, entre otros temas.

Como resultado de esta iniciativa ahora se publica el Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático, tercero de la serie “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”. Este nuevo volumen generado por el IMTA se conforma de

seis capítulos: Índice de vulnerabilidad social, Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperaturas máxima y mínima, Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México, Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales, Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático, y Calidad del agua.

Algunos de los trabajos arriba citados, realizados por el grupo de hidrometeorología del IMTA, se estructuraron con base en la generación de escenarios climáticos con una mayor resolución que los planteados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas (IPCC, por sus siglas en inglés). Ello permite analizar y valorar, con mayor precisión que la alcanzada hasta ahora, los efectos del cambio climático en el territorio nacional, considerando variaciones en la temperatura, las precipitaciones, los vientos y la humedad, entre otras variables.

También, mediante un modelo de lluvia-escurrimiento, el IMTA ha venido simulando el ciclo hidrológico, con la finalidad de conocer el lugar donde se reducirían los recursos hídricos y en qué proporción,

asimismo con la ayuda de un modelo de gestión de recursos hídricos, reproducir la gestión del sistema y evaluar los impactos para satisfacer las demandas urbanas y agrícolas.

Este documento, que se suma al acervo generado y acumulado en materia de cambio climático en nuestro país, más que mostrar una visión catastrofista, es una invitación a la reflexión sobre la necesidad de tomar medidas que permitan reducir la vulnerabilidad de nuestro país y afrontar, de la manera más adecuada, las amenazas relacionadas con el cambio climático.

Aproximarse a este fenómeno desde la perspectiva de la vulnerabilidad nos permite entender y explicar las causas y los síntomas de los desastres asociados a los fenómenos naturales, disminuir las consecuencias negativas en la organización social, y establecer una base operativa para el diseño de políticas sociales, de prevención y de adaptación del país a este enorme reto.

La SEMARNAT busca con esta publicación continuar con su labor de análisis y divulgación en favor del conocimiento social y fortalecer y brindar sustento a la toma de decisiones más adecuadas para mitigar los efectos que seguramente enfrentará nuestro país.

JUAN RAFAEL ELVIRA QUESADA  
Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales





## Capítulo 1. Índice de vulnerabilidad social

*Denise Soares, Roberto Romero y Ricardo López*





## Capítulo 1. Índice de vulnerabilidad social

### 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 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, debido a su mayor sensibilidad a la exposición a variables climáticas y a su menor resiliencia.

En este contexto, evaluar la vulnerabilidad de los grupos sociales frente al cambio climático cobra especial relevancia, al 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 permite entender y explicar las causas y síntomas de las consecuencias sociales de los desastres. Asimismo el concepto de vulnerabilidad tiene un relevante valor político, por constituir una base operativa para el diseño de políticas sociales y de adaptación al cambio climático.

En este trabajo se contribuye al avance de la discusión sobre vulnerabilidad social frente al cambio climático. Se presenta un índice de vulnerabilidad social construido explícitamente como parte de este estudio, que muestra los niveles de vulnerabilidad social que padecen los municipios en nuestro país.

### 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 climatológicos. 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 en 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 Objetivos de Desarrollo del Milenio, sino que puede paralizar, e incluso revertir, los avances conseguidos en términos de reducción de la pobreza, derechos humanos, educación, salud, infraestructura, entre otros ámbitos. Gran parte de la amenaza del cambio climático radica en la afectación del ciclo hidrológico y los regímenes de lluvias, la intensidad y frecuencia de eventos climatológicos extremos, sequías cada vez más graves a medida que sube la temperatura en el mundo, entre otros fenómenos. Todo ello impacta directamente a las poblaciones humanas,



Fotografía 1. Calle del municipio de San Felipe, Yucatán, luego del paso del huracán Isidoro.

Fuente: Protección Civil del municipio de San Felipe, Yucatán.

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 a nivel mundial, 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 de sufrir mayores o menores daños al ser impactados por éstas.

Esta investigación se ha realizado en aras de aportar elementos de análisis sobre los niveles de vulnerabilidad que padecen los municipios de nuestro país y brindar datos que sirvan de insumo para implementar programas y acciones orientados a la reducción de la vulnerabilidad social frente a eventos climáticos extremos. Dicho estudio tiene como objetivo generar información sobre la vulnerabilidad social frente al cambio climático a través de la construcción de un índice de vulnerabilidad social a nivel nacional, con una escala de análisis que aborda el nivel de municipio.

## Construcción del índice de vulnerabilidad social

### El concepto de vulnerabilidad social

Para construir el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) se revisaron diversas propuestas teóricas y metodológicas. En resumen, lo que se encontró fue que la vulnerabilidad social es un concepto en construcción, por lo que no hay un consenso entre los distintos teóricos que la analizan. No obstante, existen algunas coincidencias:

- a) se le otorga relevancia al contexto socioeconómico, cultural e institucional de las poblaciones como determinante de su capacidad para enfrentar y recuperarse de los fenómenos extremos;
- b) se precisa la presencia de una “amenaza” en la definición de las variables y factores de vulnerabilidad<sup>1</sup>;
- c) se aclara que la vulnerabilidad no es sinónimo de pobreza ni de marginación. Mientras que la pobreza es una medida descriptiva de las carencias de las personas (centrada en la medición del ingreso, el gasto y el consumo) y la marginación es una forma de exclusión social (falta de acceso a bienes y servicios elementales como educación, salud y equipamiento); la vulnerabilidad integra las carencias de la población, su exclusión social y su capacidad para enfrentarse a amenazas (Barrachena *et al.*, 2000).

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)<sup>2</sup>, 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**, pues se destaca la capacidad de una población, sistema o lugar, de amortiguar o adaptarse a las nuevas exposiciones de riesgo (Cutter *et al.*, 2009).

En este sentido es importante resaltar que el Índice de Vulnerabilidad Social que hemos construido (y cuya metodología se explica enseguida) puede tener diferencias importantes entre las regiones hidrológicamente más vulnerables. No en todos los casos una región hidrológicamente vulnerable será una región vulnerable socialmente. Los factores físicos y ambientales generan vulnerabilidades distintas a las socialmente observadas.

### Breve acercamiento a algunas metodologías de construcción de índices de vulnerabilidad social (IVS)

A partir de la definición de vulnerabilidad social antes expuesta, se revisaron algunas metodologías para desarrollar el IVS, de las cuales destacan las tres siguientes: a) el IVS (SoVI, por sus siglas en inglés) que desarrolló el Instituto de Investigaciones sobre Vulnerabilidad y Riesgos (HVRI); 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.

Para presentar las diferencias y similitudes en la forma en que construyeron sus índices las tres fuentes consultadas, presentamos 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 los aportes que hicieron estos métodos a la construcción del IVS que se desarrolló en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

1 Piers Blaikie enfatiza que la vulnerabilidad está relacionada con una peligrosidad específica (Blaikie *et al.*, 1996);

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

**Cuadro 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 1000 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
		% de desnutrición de niños y niñas	
Educación		% de analfabetismo de población adulta	% de analfabetismo de la población mayor de 15 años
			% de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela
	% que estudió menos que secundaria		Grado promedio de escolaridad
Vivienda			% de viviendas sin agua entubada
			% 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 o lámina de cartón
	% de rentistas		
	% de propietarios		
Empleo e ingreso	% de población en condiciones de pobreza	% de pobreza de consumo en los hogares	% de la PEA que recibe menos de 2 salarios mínimos
	Ingreso per cápita		
	% de desempleados		Tasa de desempleo abierto
	% de trabajadores en puestos bajos del sector servicios		
	% de trabajadores agrícolas		
Población	Crecimiento rápido de la población		Densidad de población
			Dispersión poblacional
	% Afro-americanos % Hispánicos	Presencia de comunidades étnicas y rurales	% de población de habla indígena
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, como la densidad de establecimientos y servicios médicos, 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.

La metodología generada por el Sistema Integrado de Indicadores Sociales del Ecuador (SIISE) incluye sólo cinco variables socioeconómicas para medir la vulnerabilidad social de los cantones (municipios) de 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, la metodología desarrollada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres 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 CENAPRED agrega la percepción local del riesgo y la existencia de instituciones y/o planes de atención al riesgo (principalmente Protección Civi) 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 a nivel 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

Una vez sistematizadas, comparadas y analizadas las metodologías que han sido mencionadas en el acápite anterior, investigadores del IMTA desarrollaron

el Índice de Vulnerabilidad Social a nivel municipal para México, retomando algunos aspectos de dichas metodologías. Este proceso se apegó a la definición de vulnerabilidad social compartida por el HVRI y CENAPRED. Cabe aclarar que una limitante relevante para la definición de las 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: la existencia de instituciones, planes y programas de protección civil; la percepción que los habitantes tienen sobre el riesgo en sus localidades; el potencial y antecedente organizativo de las poblaciones, entre otros aspectos que deberían estar presentes en una versión ideal de un índice de vulnerabilidad social integral. Hecha esta salvedad, compartimos a continuación el proceso metodológico de construcción del índice de vulnerabilidad social para los municipios de México.

La construcción 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; b) la construcción de índices de vulnerabilidad temática y c) la construcción del índice de vulnerabilidad social definitivo.

### a) Definición temática y construcción de indicadores

Con la información disponible<sup>3</sup>, se seleccionaron 15 indicadores que se agruparon, siguiendo la propuesta de Cenapred, en cinco grandes temas que determinan la capacidad de desarrollo de una comunidad: empleo e ingreso, educación, salud, vivienda y 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.

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, tomando los datos de las fuentes mencionadas, es decir, el *XII Censo de Población y Vivienda 2000* del INEGI, 2001, el *Índice de Marginación* de CONAPO, 2001 y el *Atlas de Salud* del Instituto Nacional de Salud Pública, 2003.

**Cuadro 2. Indicadores seleccionados para construir el IVS.**

Tema	Indicadores	Fuente
Salud	Proporción de médicos por cada 1000 habitantes	INSP
	Tasa de mortalidad infantil (Proporción de niños fallecidos antes de un año en relación a los nacidos vivos en el mismo período)	CONAPO
	% de población no derechohabiente (% de población que no cuenta con servicios de salud pública)	INEGI
Educación	% de analfabetismo (% de población de 15 años y más que no sabe leer ni escribir)	INEGI
	Grado promedio de escolaridad	INEGI
Vivienda	% de viviendas sin agua entubada	INEGI
	% de viviendas sin drenaje	INEGI
	Déficit de vivienda (% de viviendas que faltan para satisfacer la demanda de los hogares)	INEGI
	% de viviendas con piso de tierra	CONAPO
Empleo e ingreso	% de la PEA que recibe menos de 2 salarios mínimos	CONAPO
	Razón de dependencia (% de población dependiente –menores de 15 años y mayores de 65 años– en relación a la población económicamente productiva)	INEGI
Población	Densidad de población (habitantes por Km <sup>2</sup> )	INEGI
	% de población de habla indígena	INEGI
	% de jefas de familia	INEGI
	Dispersión de la población (% de población que habita en localidades menores a 2,500 habitantes)	INEGI

Fuentes: INEGI (2001) *XII Censo General de Población y Vivienda 2000*; CONAPO (2001), *Índice de Marginación 2000*; INSP (2003), *Atlas de Salud*.

Al porcentaje obtenido se le otorga una calificación que señala la condición de vulnerabilidad de cada indicador. 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 nuestro 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, 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.
5. Finalmente, una vez clasificados los indicadores se les asigna una calificación, de acuerdo con el siguiente criterio, basado en rangos:

<sup>3</sup> Para la construcción de este índice se trabajó con los datos del Censo General de Población y Vivienda del 2000 y no con el Censo de Población de 2005, debido a que el censo incluye más variables o indicadores que las contempladas por el censo. Con objeto de emplear datos del mismo año, se trabajó con el índice de marginación de 2000 que elaboró CONAPO.

**Cuadro 3. Calificación de la condición de vulnerabilidad social**

Condición de vulnerabilidad social	Calificación
Muy alta vulnerabilidad social	1.00
Alta vulnerabilidad social	0.80
Media vulnerabilidad social	0.60
Baja vulnerabilidad social	0.40
Muy baja vulnerabilidad social	0.20

Fuente: Elaboración propia.

Dicho procedimiento es la regla general para la mayoría de los indicadores; sin embargo existen tres excepciones en 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 mil habitantes, 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 mil habitantes.

A manera de ejemplo en el cuadro 4 se observa el desarrollo de este procedimiento metodológico.

### b) 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 general cada indicador tiene el mismo peso (1.0) en la construcción de cada índice temático; sin embargo, existen dos excepciones: a) en el índice de educación, de las dos variables que lo conforman, se le dio más peso al grado promedio de escolaridad (1.0) que al porcentaje de población analfabeta (0.5), esto es porque el porcentaje de analfabetos en el país es bajo (18%) e influye más el aprovechamiento escolar a la hora de acceder e interpretar la información sobre eventos climáticos; b) en el índice de empleo, se le dio más relevancia al ingreso salarial (1.0) que a la razón de dependencia<sup>4</sup> (0.5), debido a que

<sup>4</sup> La razón de dependencia es el porcentaje de población dependiente (menores de 15 y mayores de 65 años) en relación a la PEA.

**Cuadro 4. Ejemplo de construcción de indicadores**

TEMA		EMPLEO E INGRESO		EDUCACIÓN	
Variable		Población ocupada con ingreso de hasta 2 SMM	Razón de dependencia	Población analfabeta	Grado de escolaridad
Valor Menor		18.41	37.72	1.07	1.11
Valor Mayor		98.88	143.02	75.01	12.09
Rango (mayor-menor)		80.47	105.304	73.94	10.98
Intervalo (rango dividido entre 5)		16.094	21.06	14.79	2.196
Condición de vulnerabilidad	Calificación	Rangos	Rangos	Rangos	Rangos
Muy Alta	1.0	82.790 - 98.884	121.964 - 143.024	60.234 - 75.024	1.100 - 3.306
Alta	0.8	66.695 - 82.789	100.903 - 121.963	45.443 - 60.233	3.307 - 5.503
Media	0.6	50.600 - 66.694	79.842 - 100.902	30.652 - 45.442	5.504 - 7.700
Baja	0.4	34.505 - 50.599	58.781 - 79.841	15.861 - 30.651	7.701 - 9.897
Muy Baja	0.2	18.410 - 34.504	37.720 - 58.780	1.070 - 15.860	9.898 - 12.094

Fuente: Elaboración propia.

actualmente la edad es cada vez menos importante para ingresar al mercado laboral; los mexicanos ingresan más jóvenes a trabajar y se retiran con mayor edad.

### c) Construcción del índice de vulnerabilidad social definitivo

Para construir el índice de vulnerabilidad social definitivo, en primer lugar, se promedian las calificaciones de los cinco índices temáticos. 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).

Siguiendo el procedimiento anterior, la definición del índice de vulnerabilidad social definitivo, resulta en condiciones de vulnerabilidad como se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro 5. Condición de vulnerabilidad social final**

Estadísticos	Valores
Valor Menor	0.24
Valor Mayor	0.91
Rango (mayor-menor)	0.67
Rango dividido entre 5	0.13
Condición de vulnerabilidad	Rangos
Muy Alta	0.79 - 0.91
Alta	0.65 - 0.78
Media	0.52 - 0.64
Baja	0.38 - 0.51
Muy Baja	0.24 - 0.37

Fuente: Elaboración propia.

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 *ArcMap*. El resultado de este procedimiento fue la obtención de 32 mapas (uno por cada estado y el Distrito Federal). Es importante mencionar que se obtuvo el índice de vulnerabilidad social de todo el país, con excepción del municipio de Nicolás Ruiz en Chiapas, debido a que el Censo de Población y Vivienda del 2000 no se aplicó en este lugar.

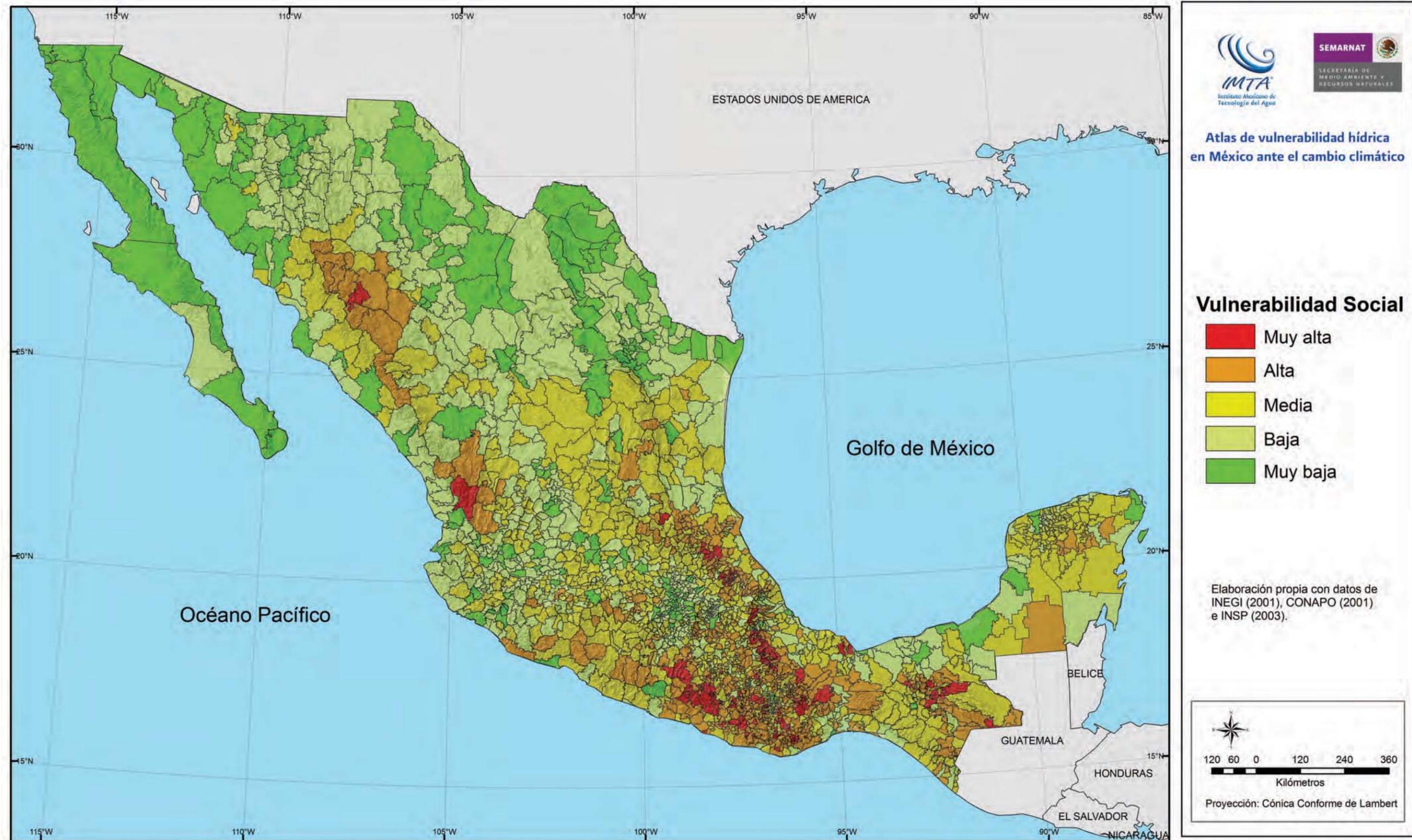
### **Mapas municipales con el índice de vulnerabilidad social**

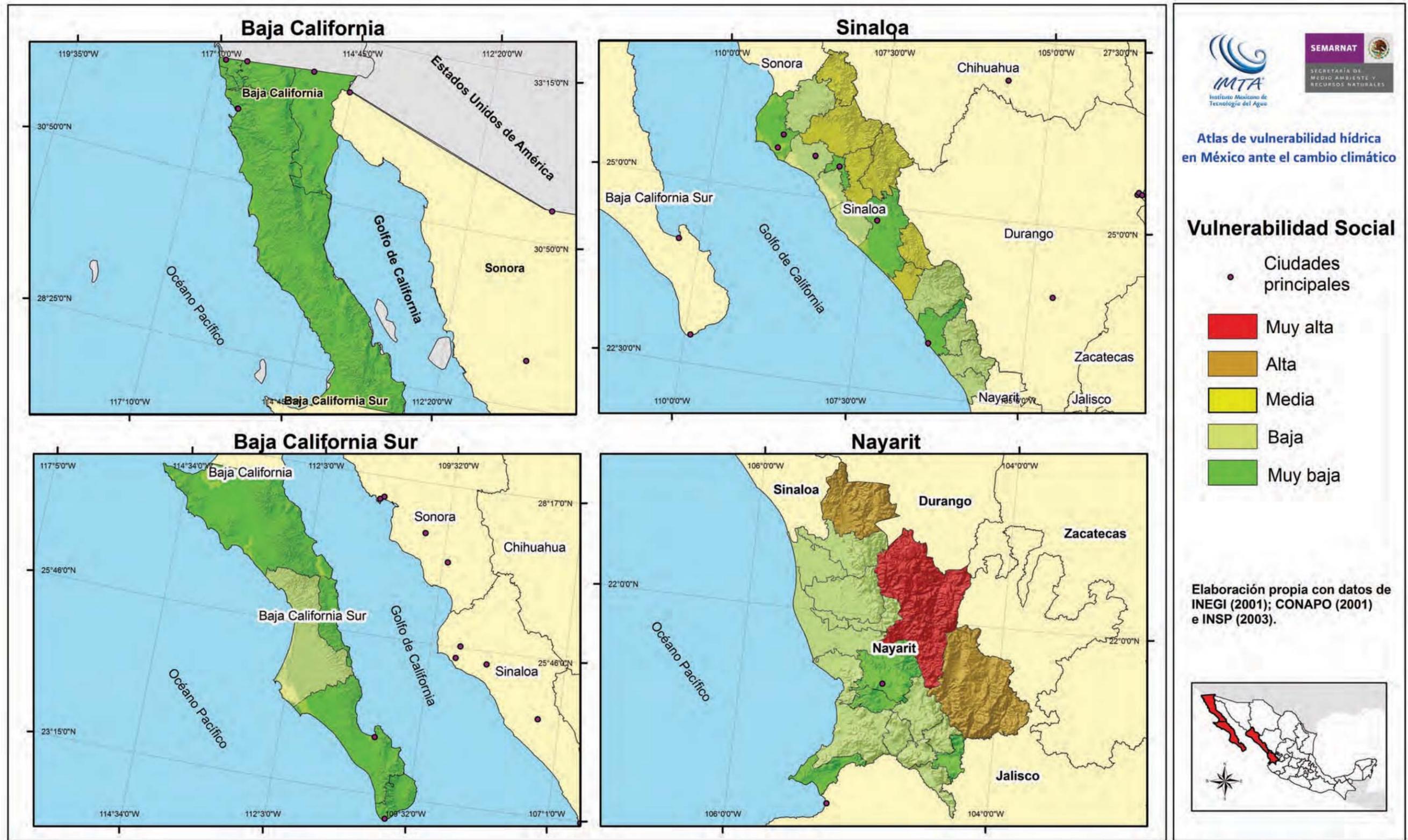
Con objeto de lograr una versión del IVS que permitiera una clara visualización de la vulnerabilidad social de los municipios del país, se realizaron varias pruebas en cuanto al número ideal de rangos en los que se dividiría el índice final; se

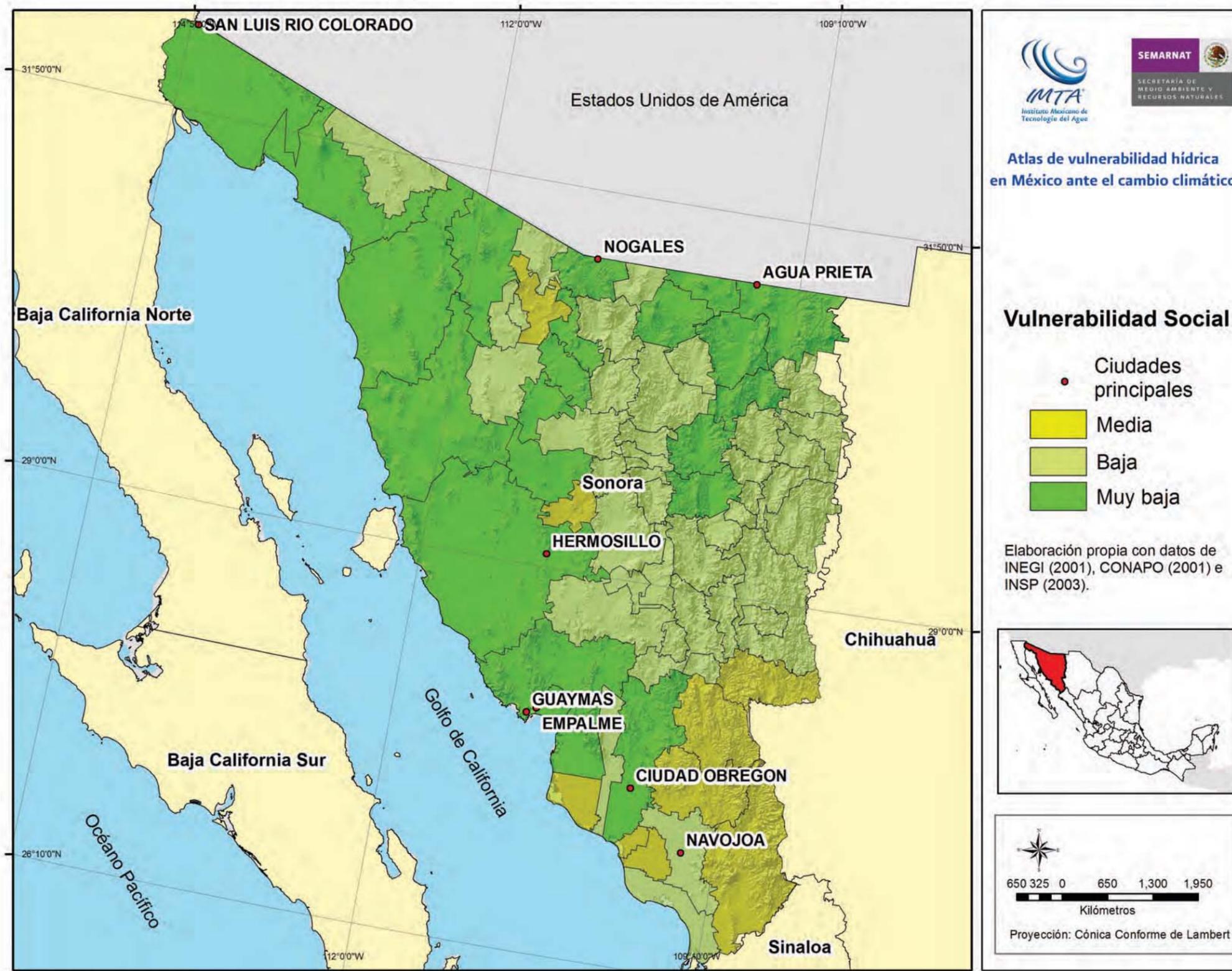
probó con tres y con cinco niveles de vulnerabilidad, siendo esta última opción la que mejor muestra la diversidad municipal en cuanto a la vulnerabilidad social.

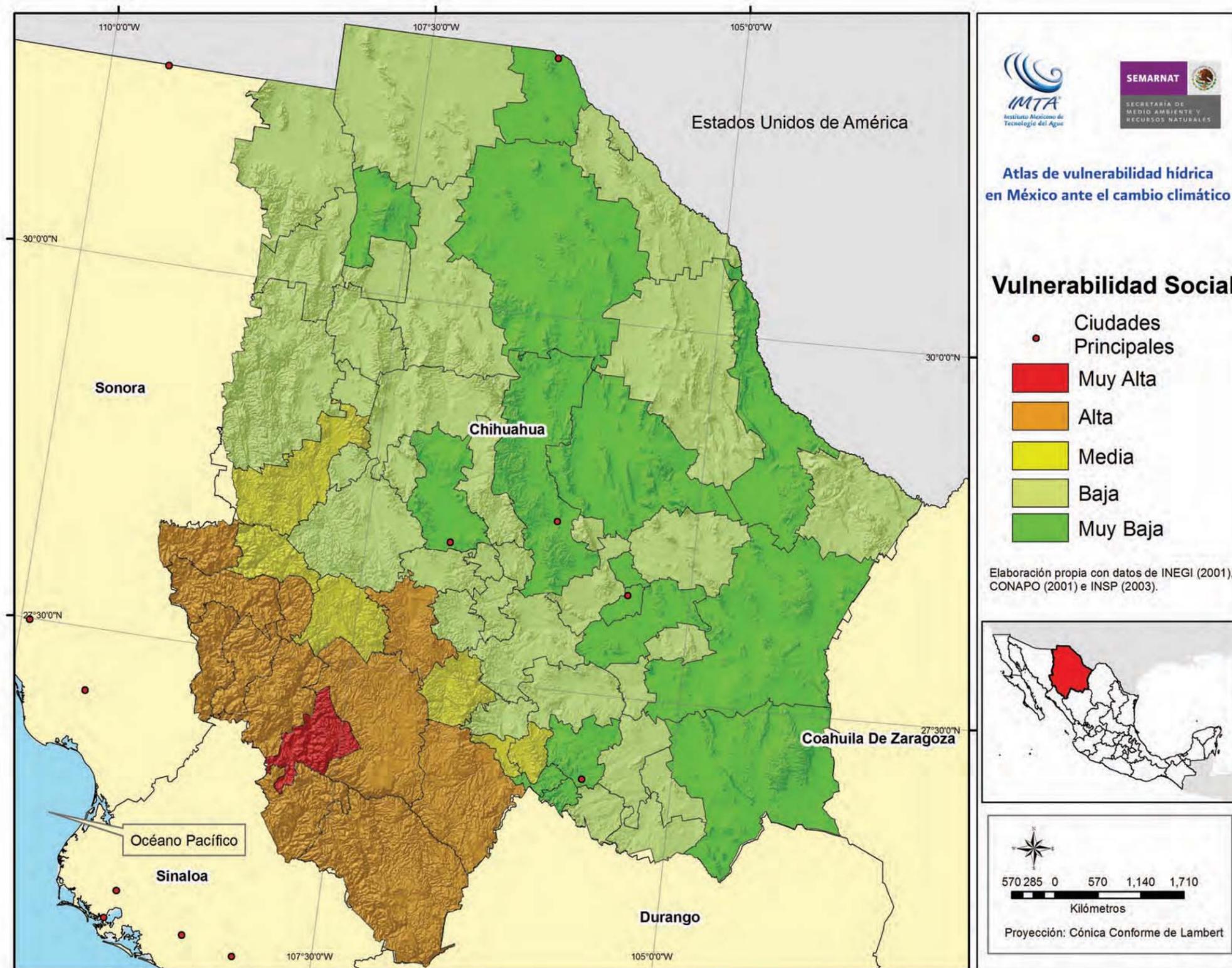
Por otro lado, se decidió presentar los mapas con el IVS de los estados a partir de los siguientes criterios: a) los estados que tienen más municipios se exponen en una hoja por separado y los doce estados que tienen menor cantidad de municipios se agruparon en cuatro estados por página y b) la presentación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

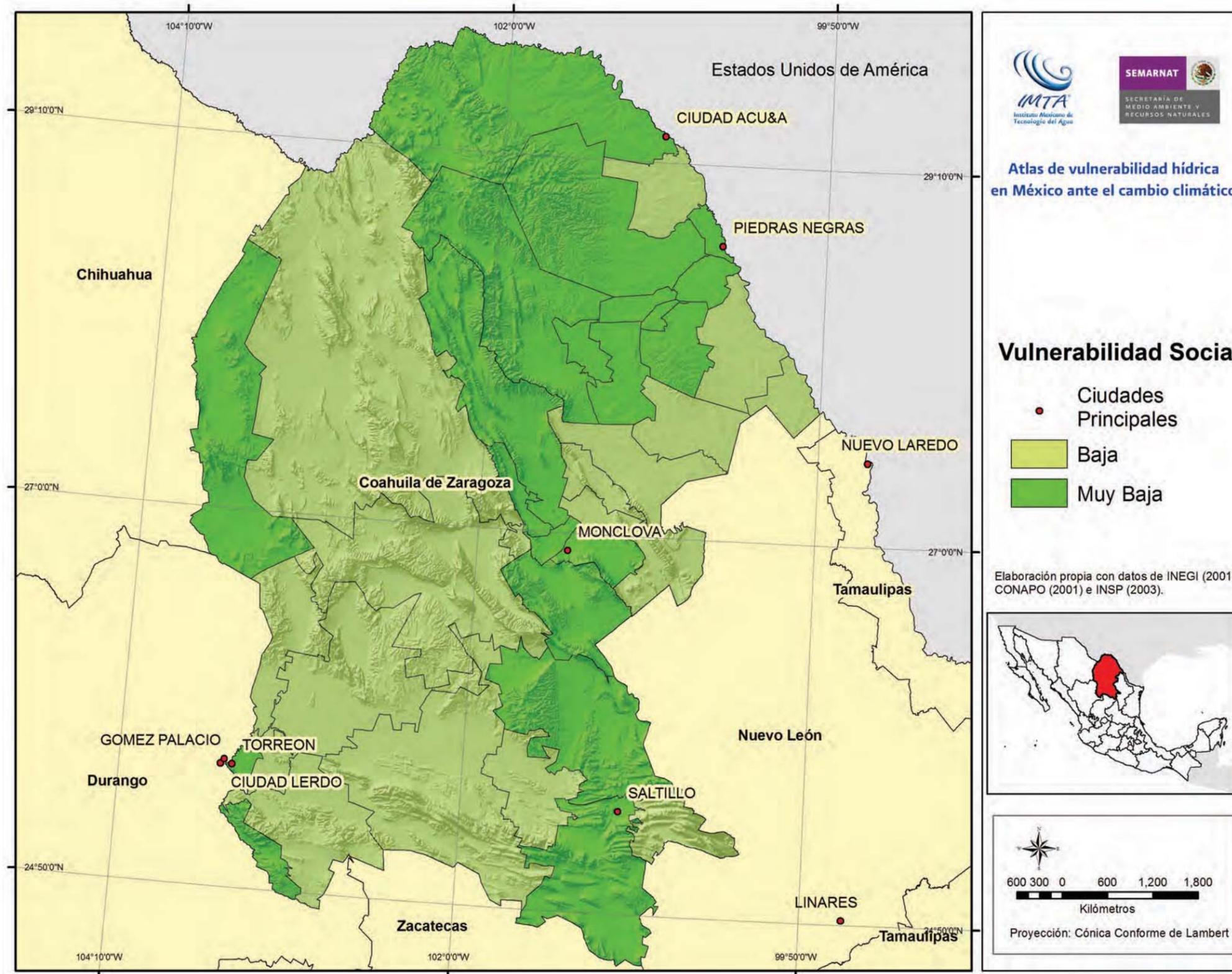
Los mapas generados, que se muestran en las páginas siguientes, reflejan los niveles de vulnerabilidad social de cada municipio de la República Mexicana y pueden ser un importante insumo para la definición de políticas de combate a la pobreza, de adaptación al cambio climático y de prevención de riesgos de desastres.

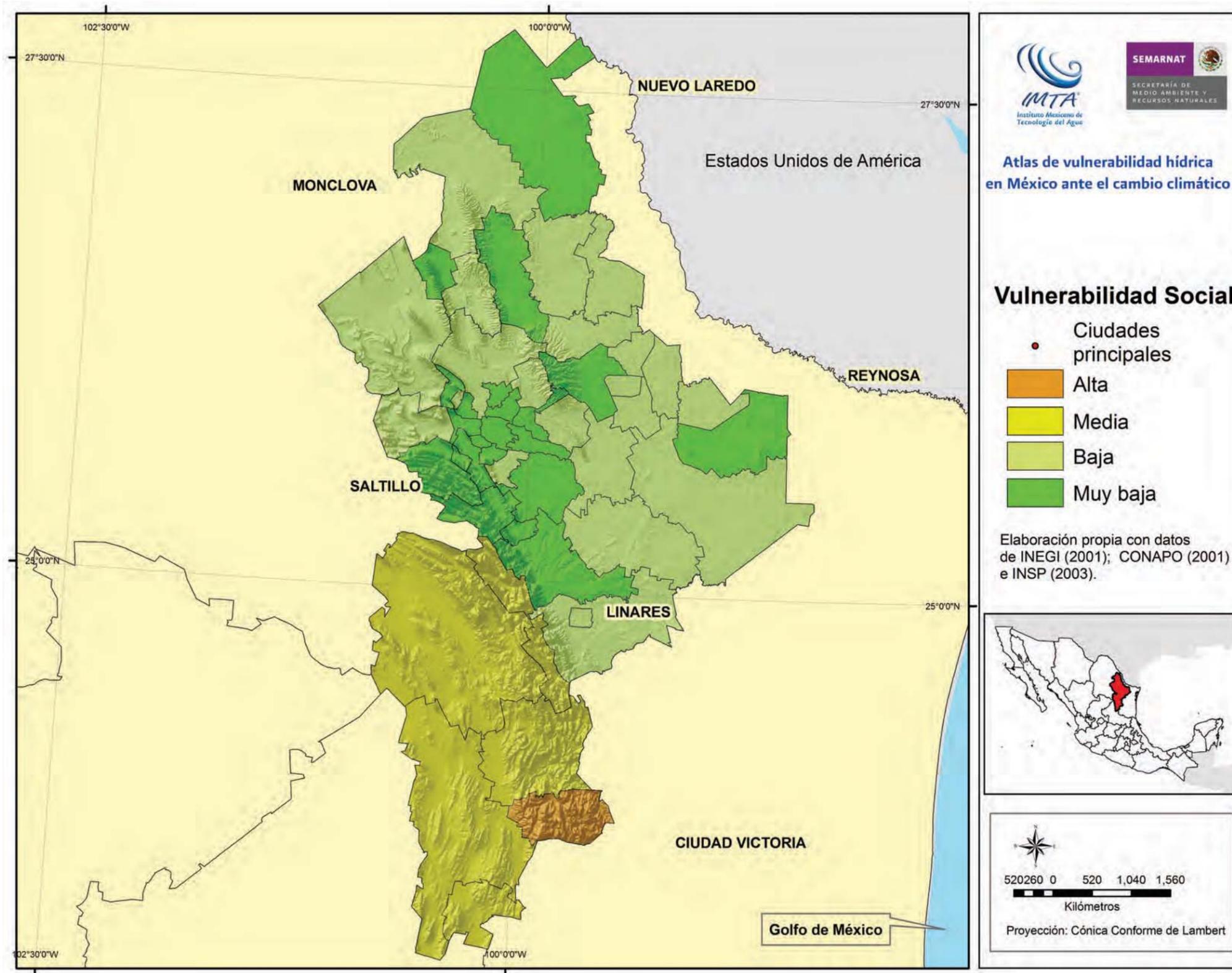


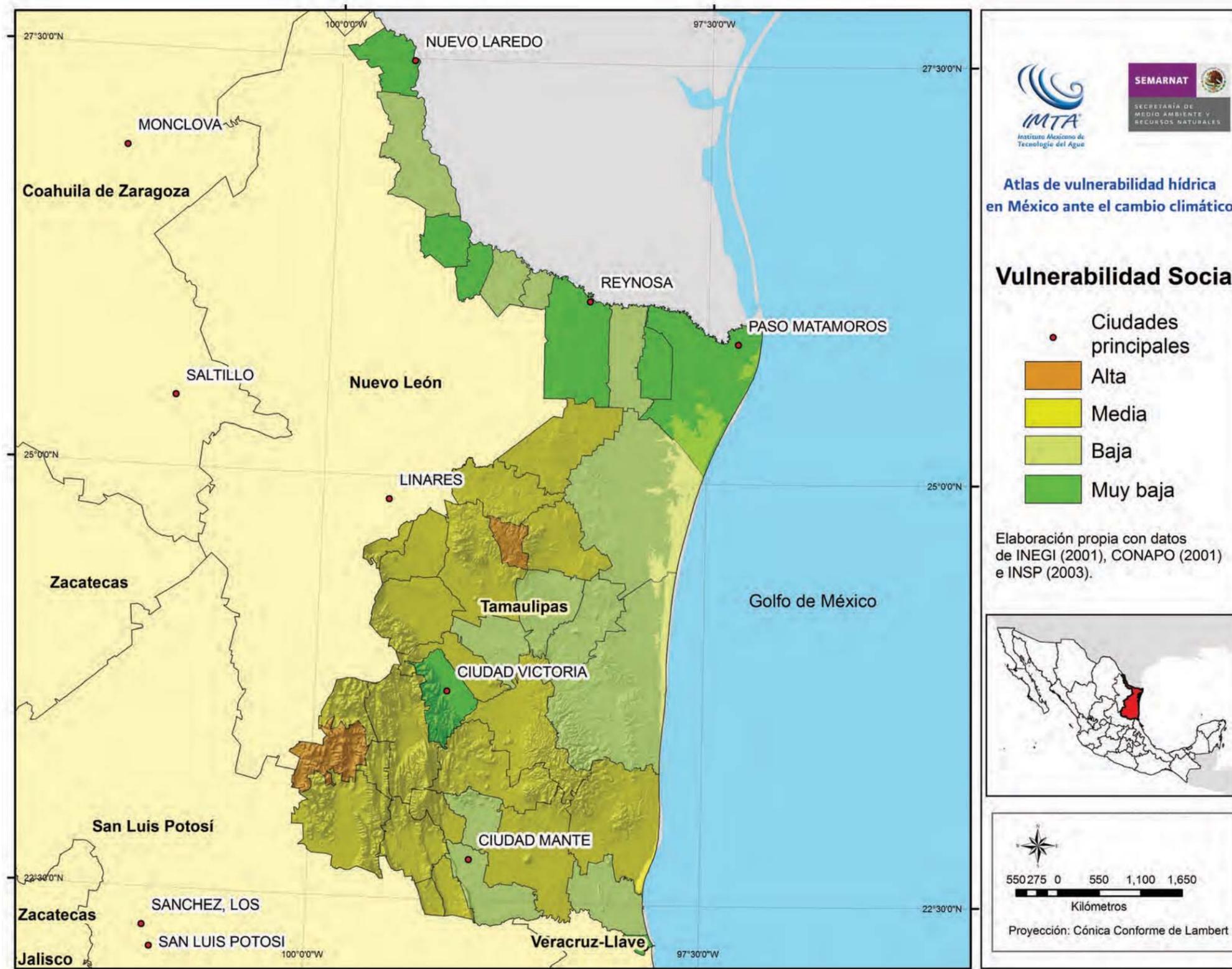


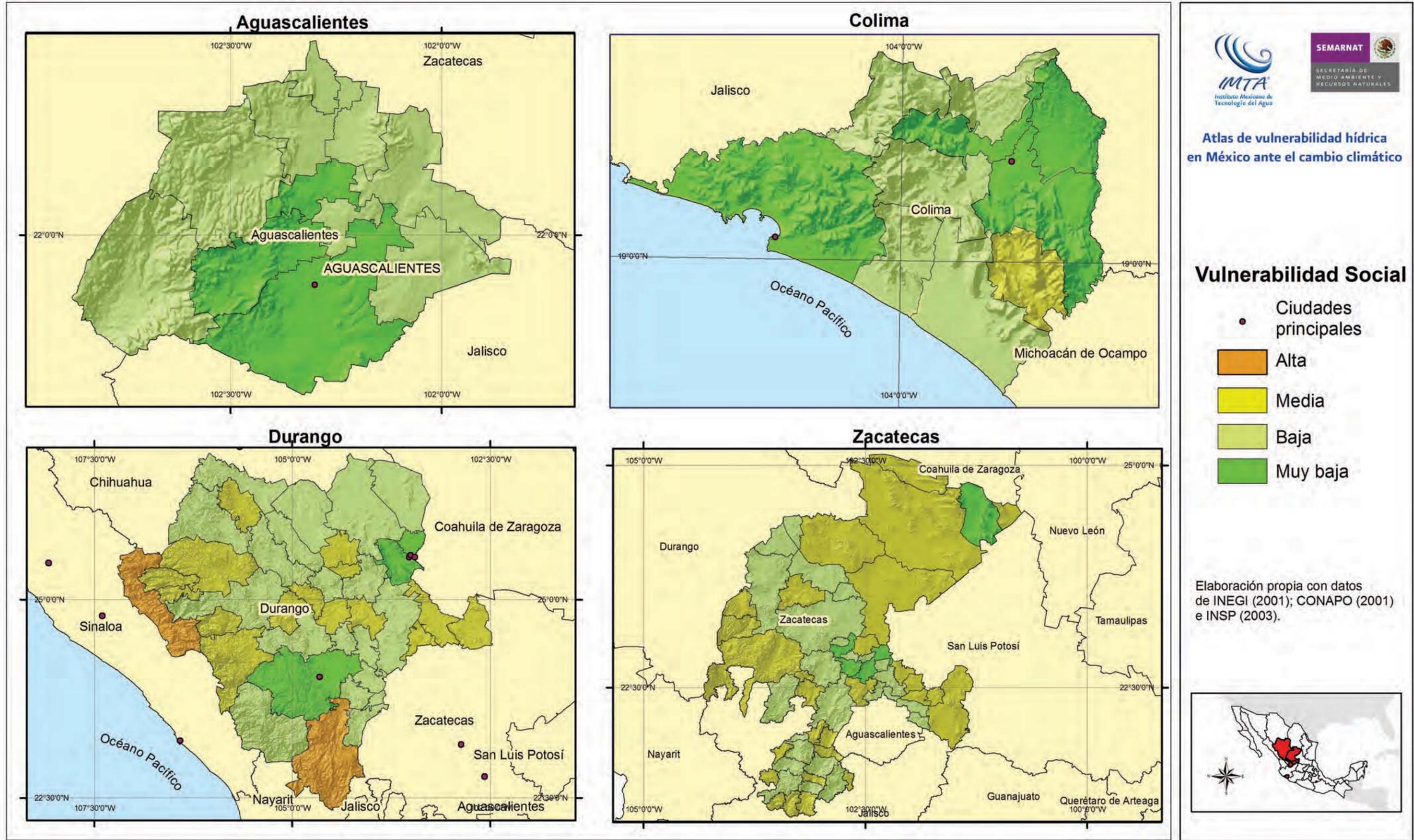


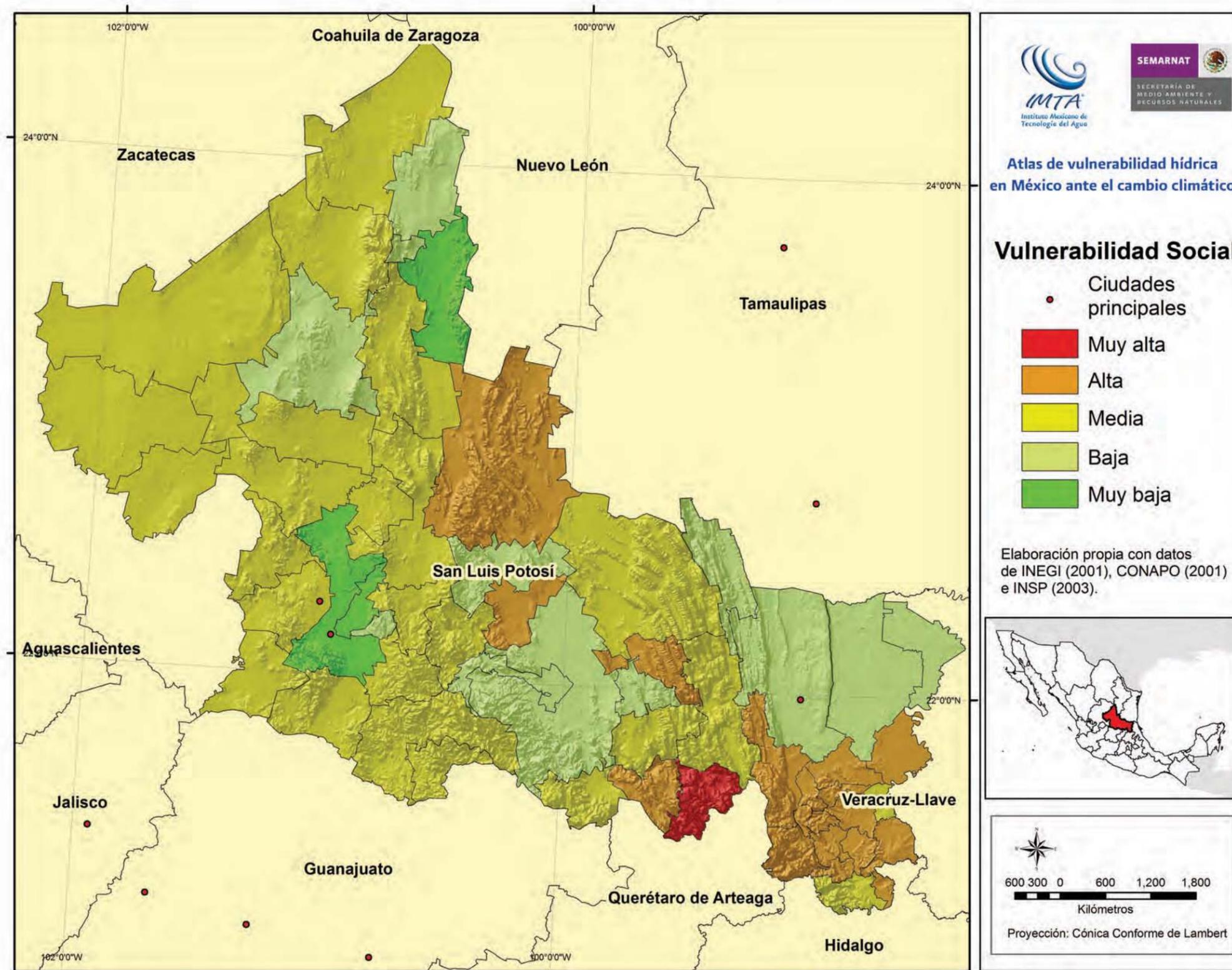


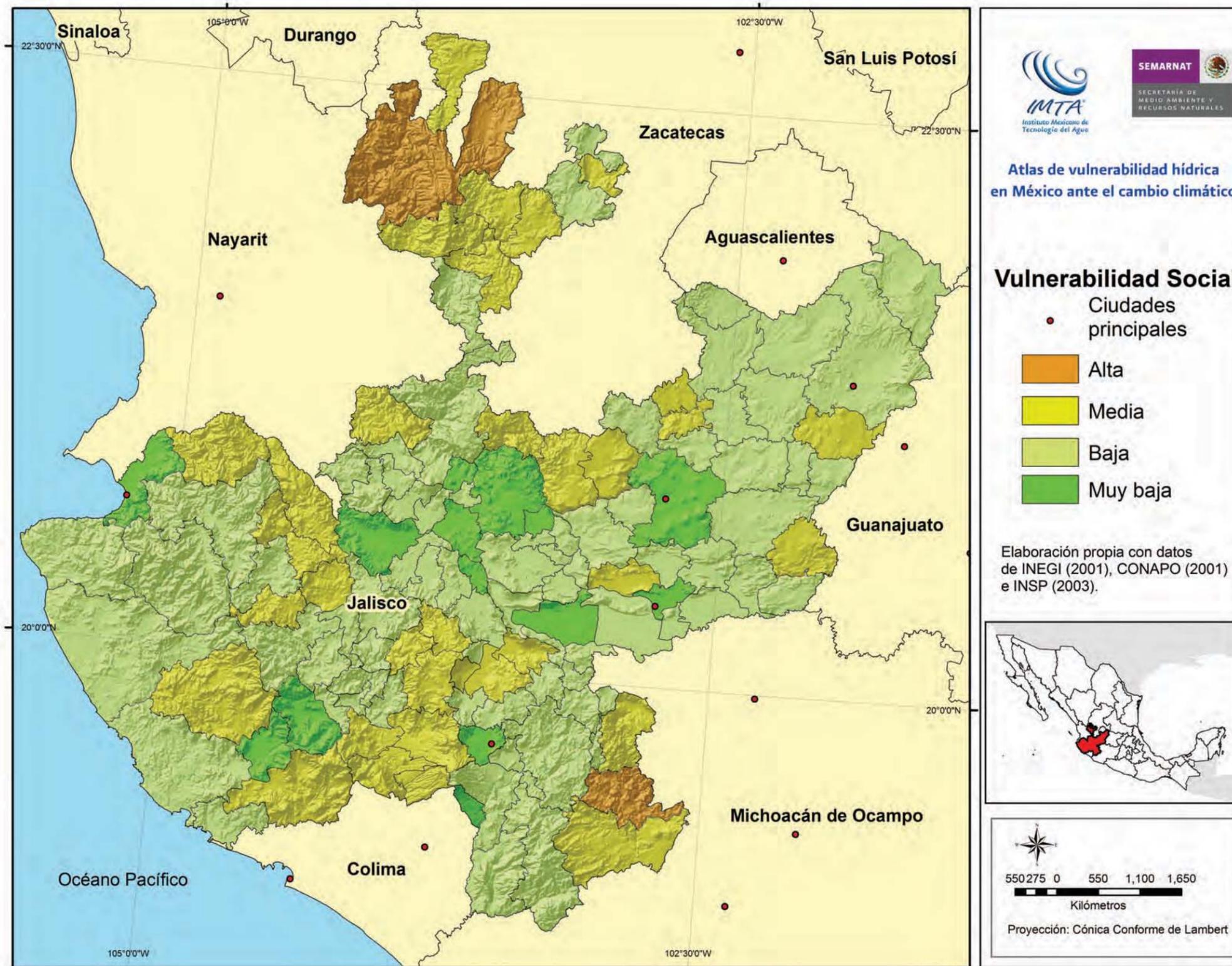


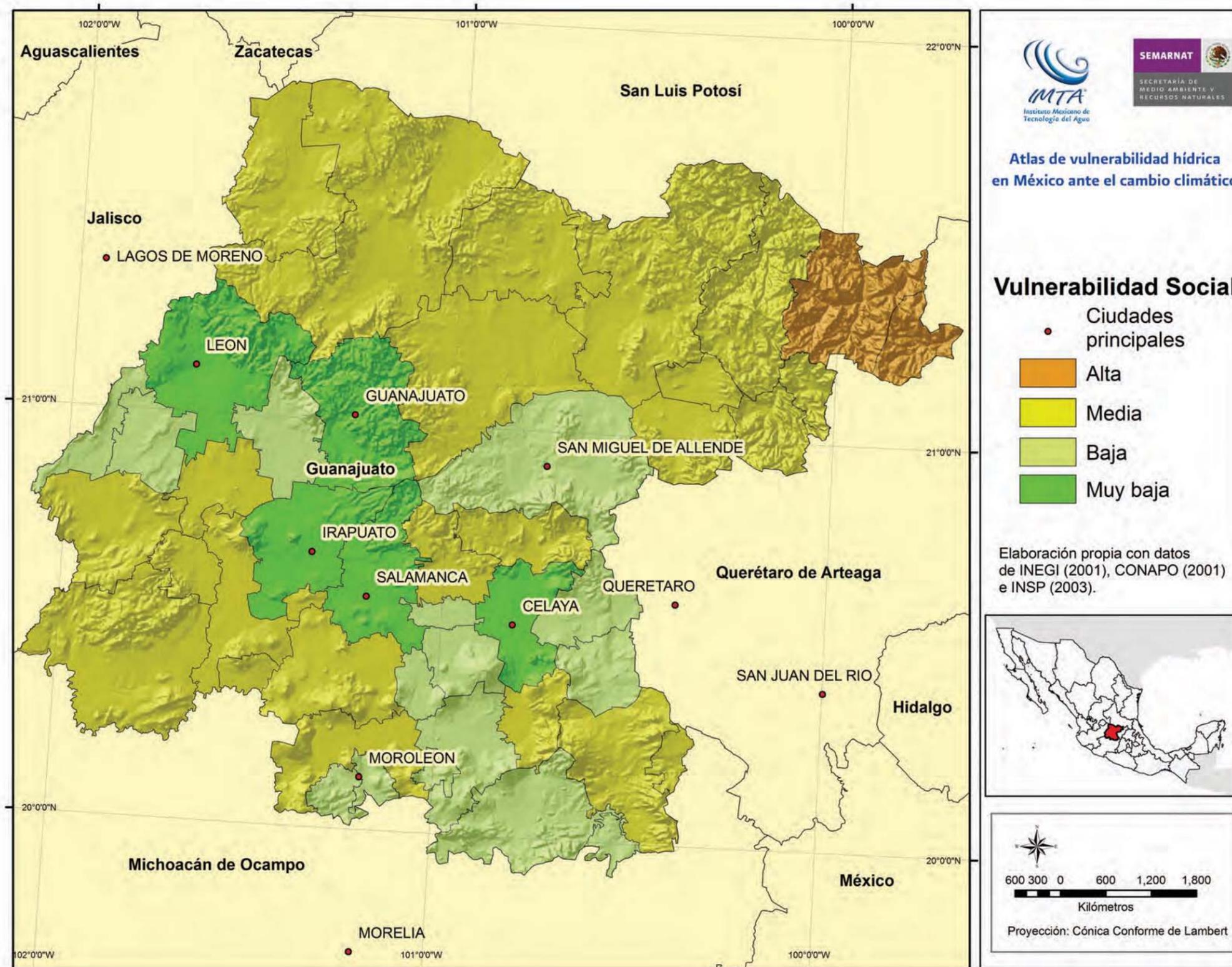


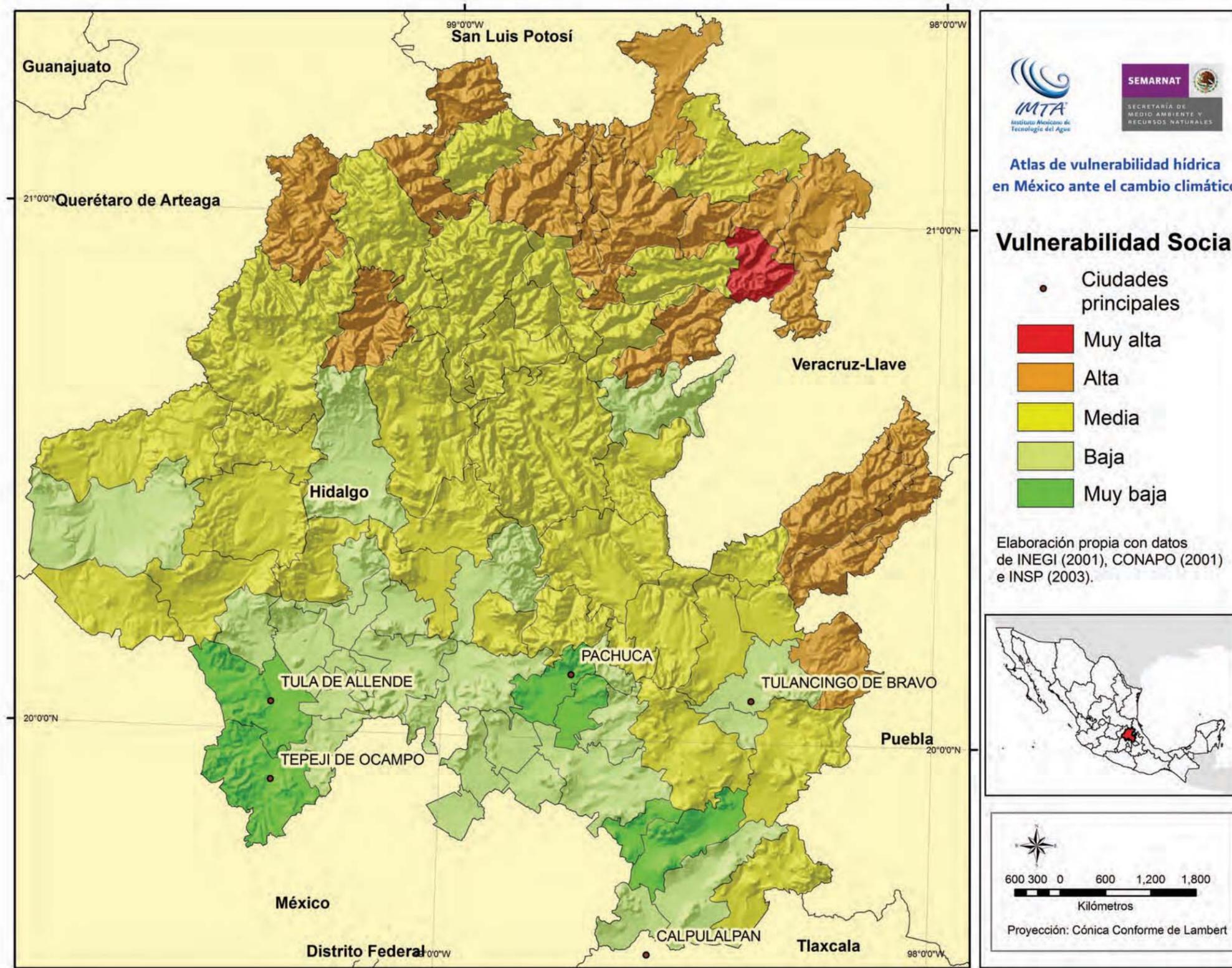


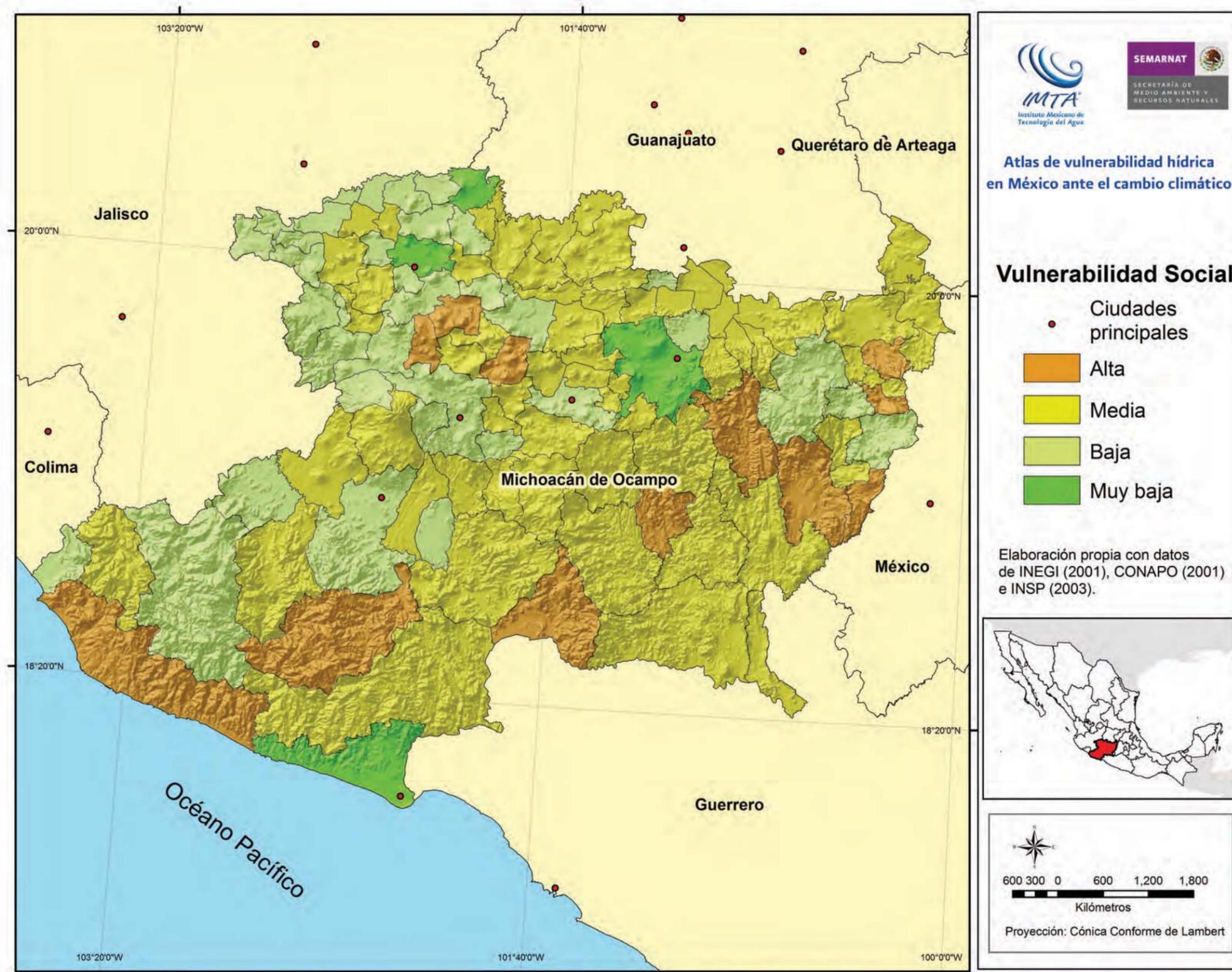


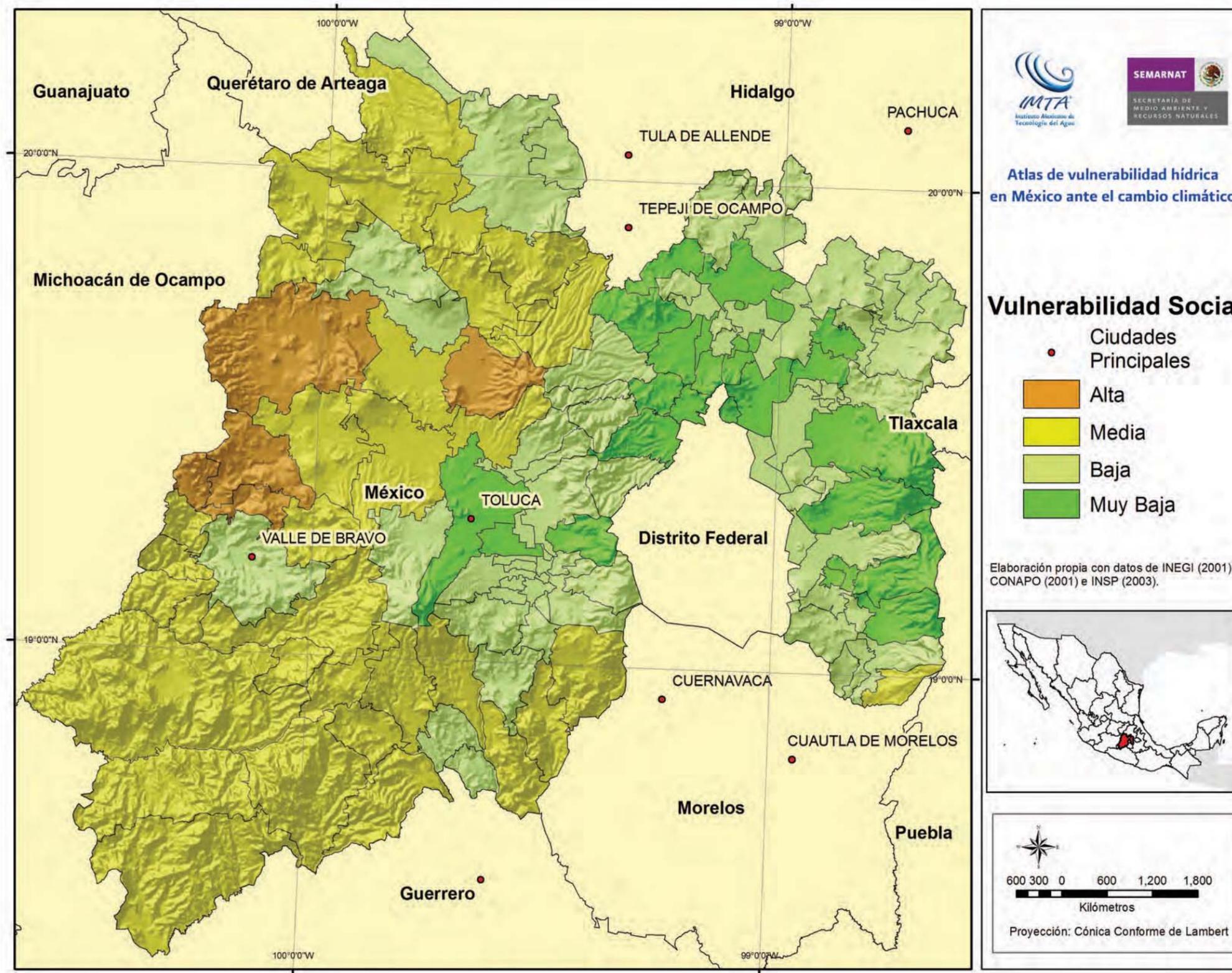


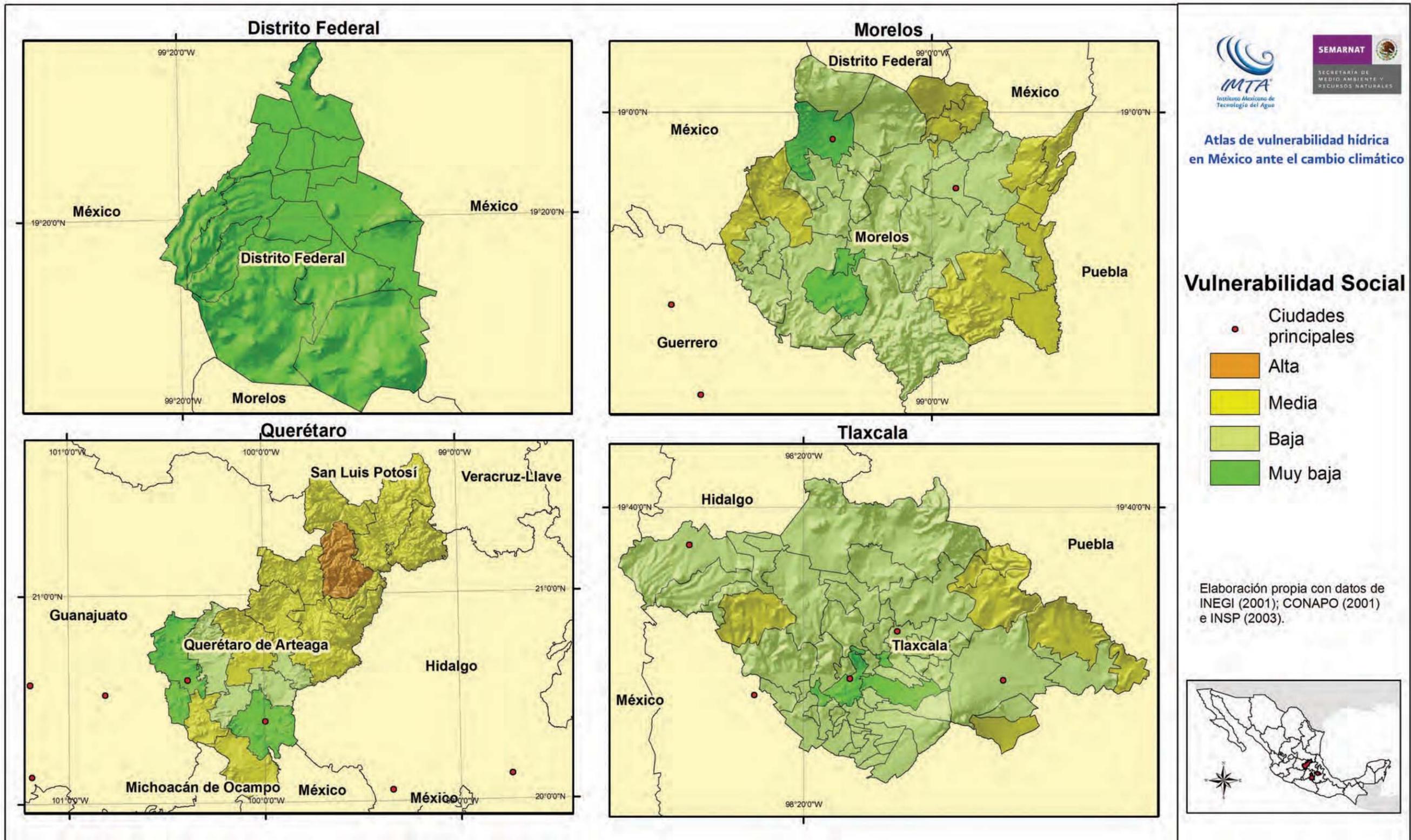


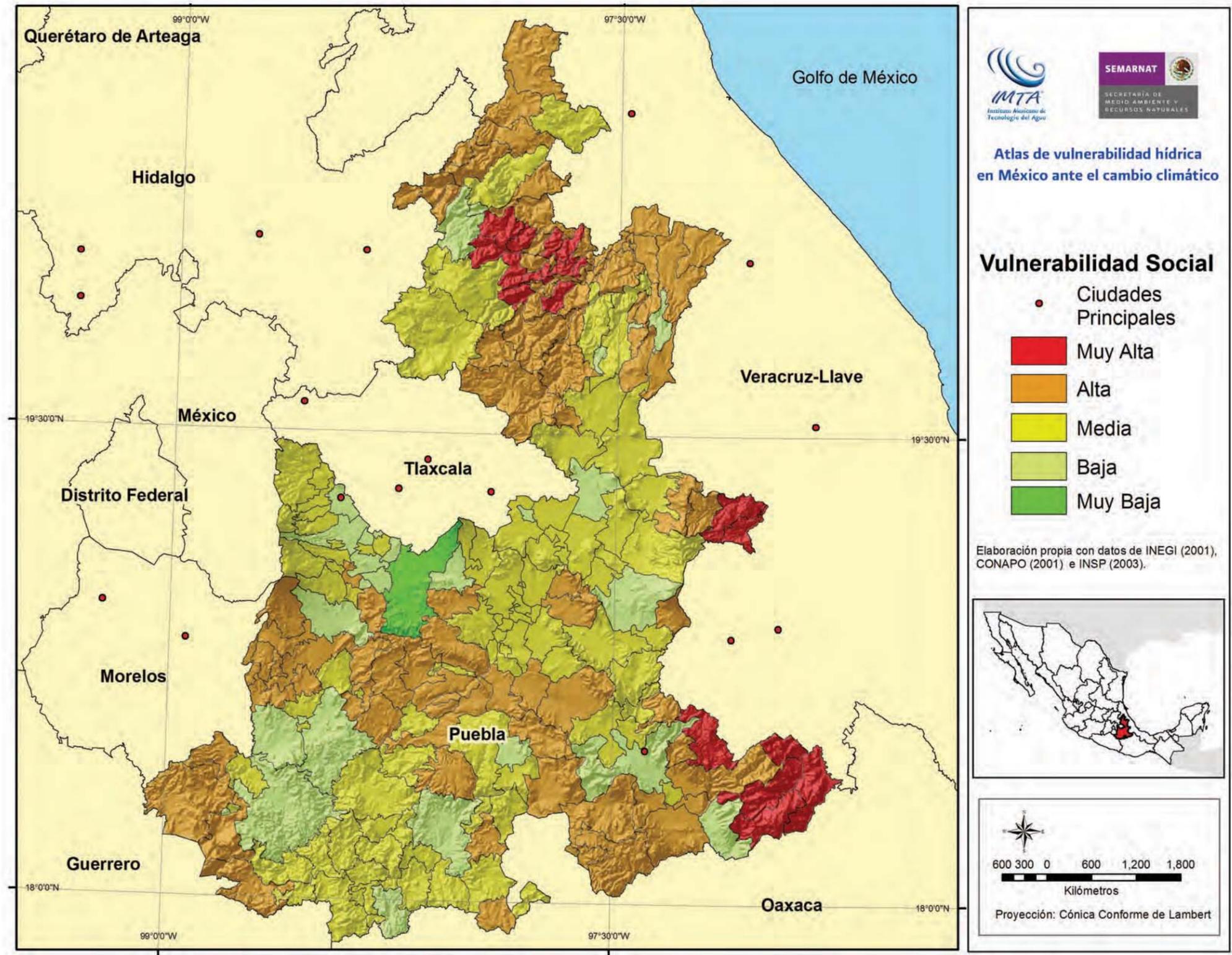


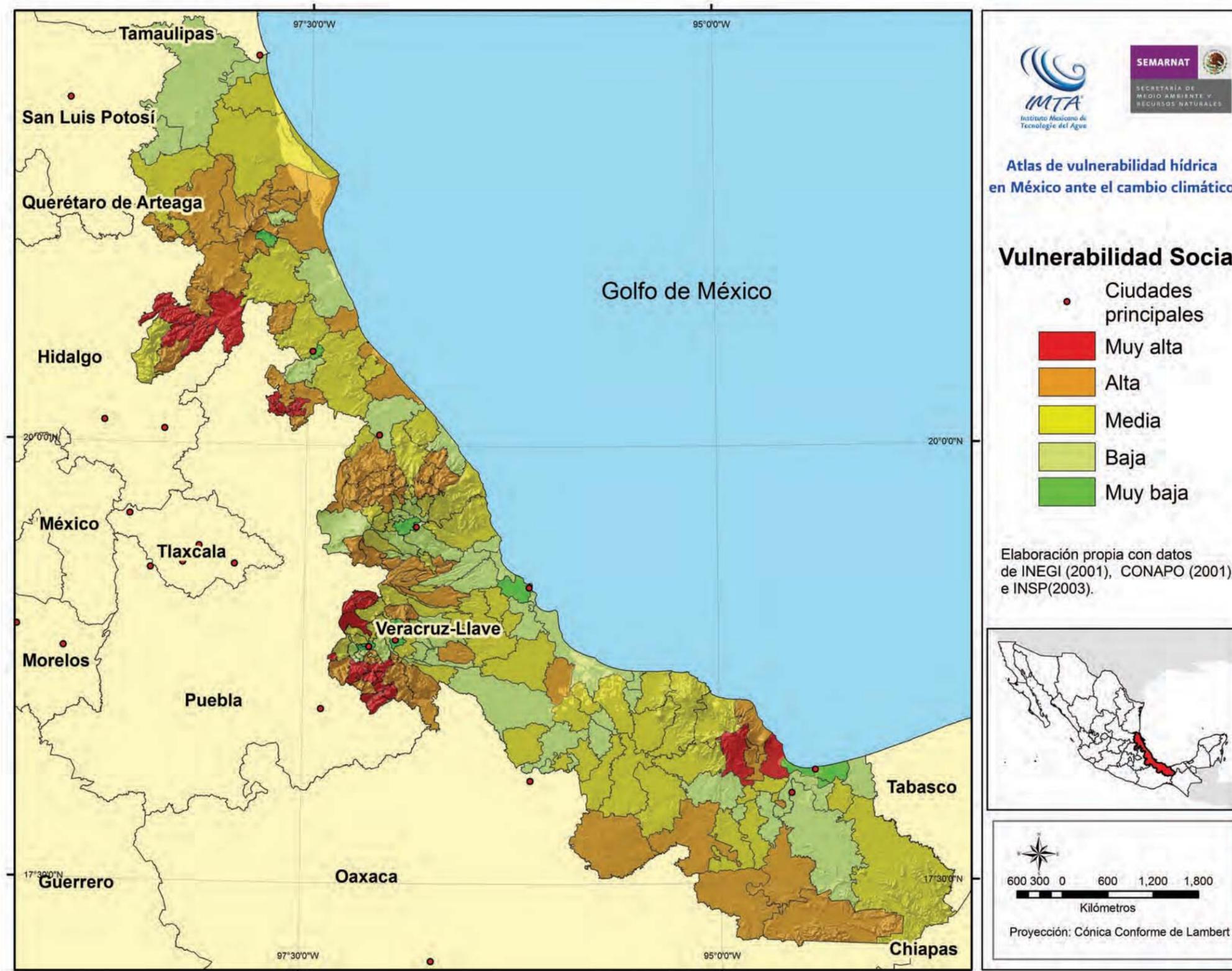


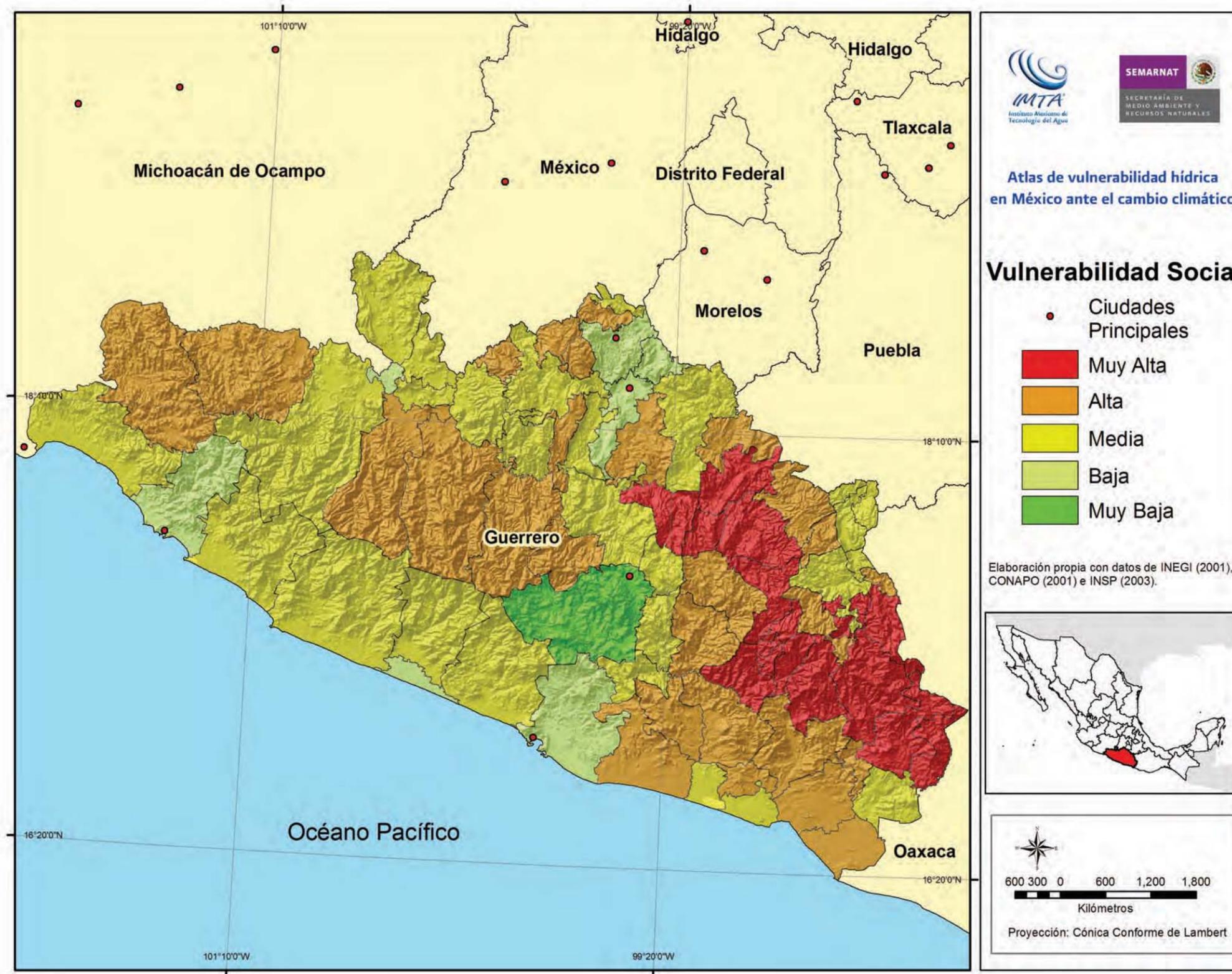


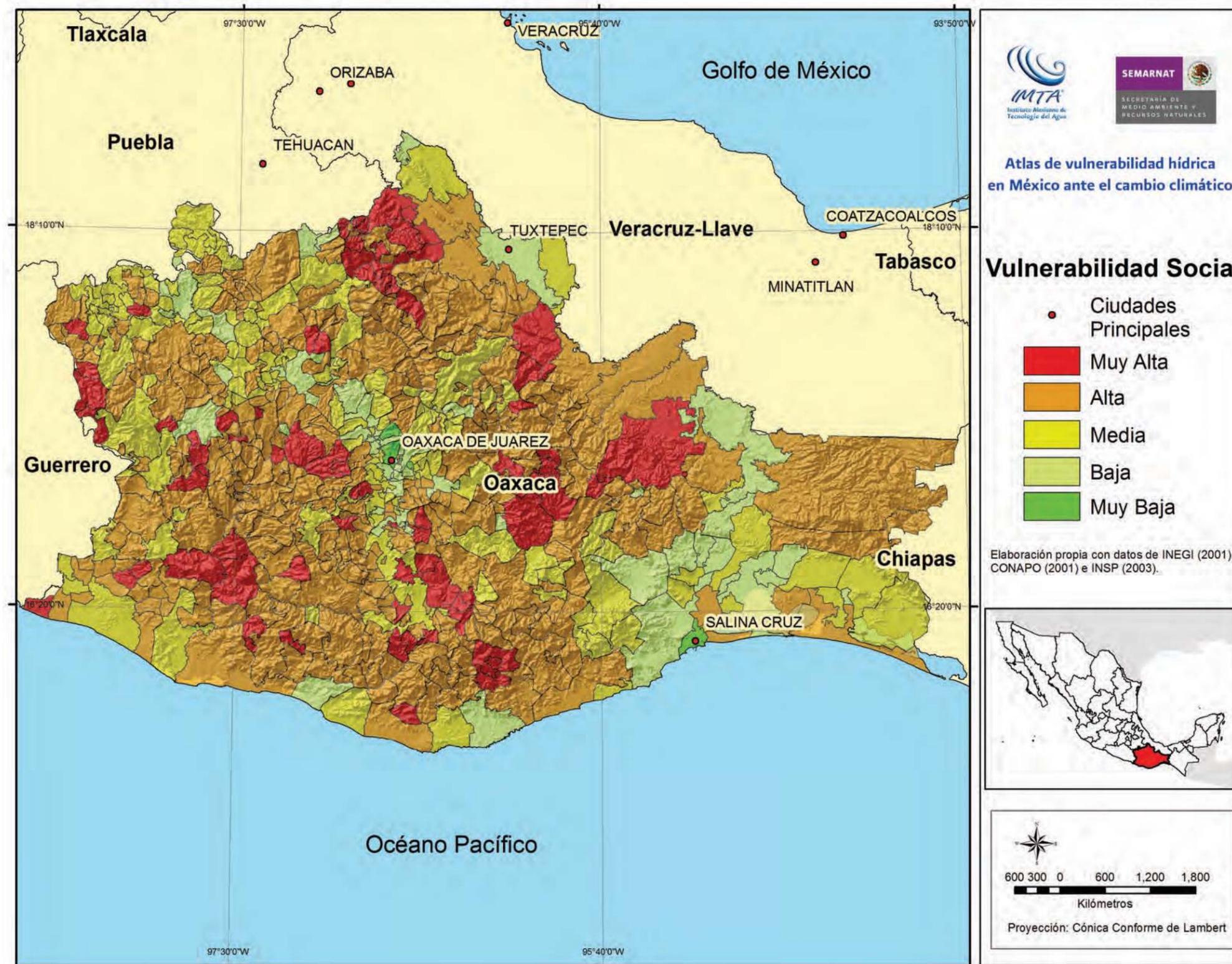


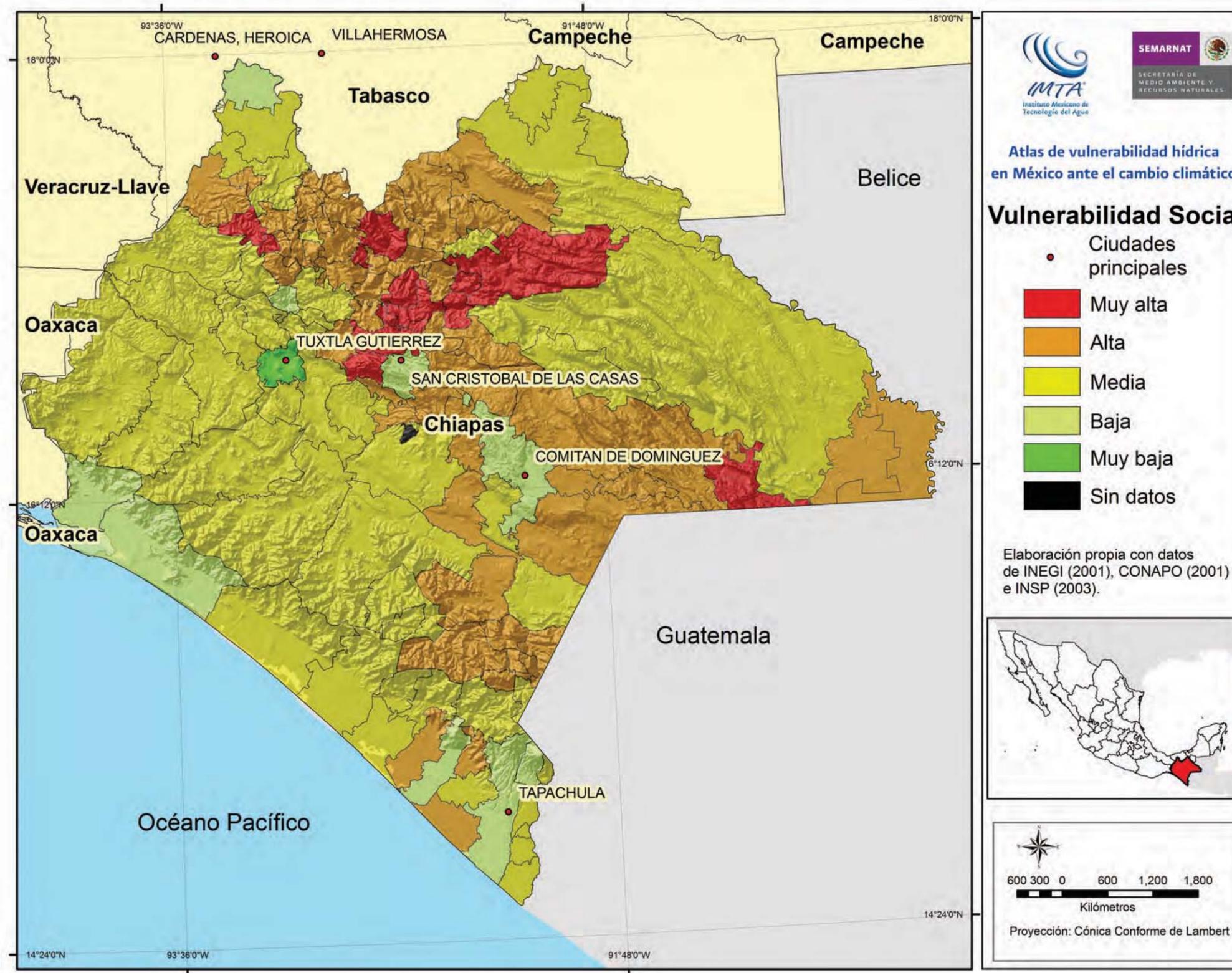












## Conclusiones y recomendaciones

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

En este contexto, la elaboración de un índice de vulnerabilidad social de los municipios del país, constituye una herramienta útil para conocer los lugares en donde se ubican las zonas más susceptibles de ser afectadas por los eventos climáticos extremos. Con este instrumento, las instancias gubernamentales correspondientes de los tres niveles de gobierno, la Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 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 los programas y acciones que mejoren las condiciones de vida de esas comunidades y, al mismo tiempo, generen las habilidades de los pobladores que les permitan estar mejor capacitados para prevenir, enfrentar y adaptarse a los eventos naturales 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 índice de vulnerabilidad social sea una herramienta de relevancia para la definición de políticas públicas y focalización de recursos, es perfectible y uno de los aspectos fundamentales en ese sentido sería la alimentación de datos más precisos sobre municipios y localidades, que no se encuentran en las fuentes estadísticas nacionales. En una versión más integral de un nuevo índice de vulnerabilidad social 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. En ese sentido, sería conveniente que INEGI ampliara sus bases de datos tomando en cuenta algunos de los referentes arriba mencionados.

## Referencias

Barrachena, Julieta, Elvira Gentile, Silvia González y Claudia Natenzon (2000). *Una propuesta metodológica para el estudio de la vulnerabilidad social en el marco de la teoría social del riesgo*. Ponencia presentada en las IV<sup>a</sup> Jornadas de Sociología. Facultad de Ciencias Sociales, UBA. Buenos Aires 6 al 10 de noviembre de 2000.

Blaickie, Piers, Terry Cannon, Ian Davis y Ben Wisner (1998): *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*. Bogotá, LA RED/ITDG.

Consejo Nacional de Población (2001), *Índices de Marginación 2000*, Conapo, México.

Cutter, Susan L, Christopher T. Emrich, Jennifer J. Webb 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.

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.

INEGI (2001), *XII Censo de Población y Vivienda 2000*, México.

Instituto Nacional de Salud Pública (2003). *Atlas de Salud 2003*, INSP, México, <http://sigsalud.insp.mx/atlas2003/atlas2003.php>, Consultado mayo, junio 2010.

Instituto de Recursos Mundiales (2006), *Guía de Recursos Mundiales: La Riqueza del Pobre*, Instituto de Recursos Mundiales, PNUD, PNUMA, Banco Mundial.

PNUD (2007), *Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008 - La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido*, PNUD, Nueva York.

PNUD (2008), *Guía recursos de género para el cambio climático*, PNUD, México.

SIISE (2003), *Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) ¿Qué es?*, SIISE Consultado en: <http://www.unesu.org/far.AEE05/Lectura.vulnerabilidad1.pdf>, Consultado julio de 2010.

## Agradecimientos

Al M. en C. Alberto Balancán Soberanis por su apoyo en la elaboración de los mapas, a la Biol. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su apoyo en la coordinación general del documento.





## Capítulo 2. Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperaturas máxima y mínima

*Martín José Montero Martínez, Jessica Martínez Jiménez, Nadia Itzel Castillo Pérez y Brisia Edit Espinoza Tamarindo*





### Resumen

La regionalización (*downscaling*) de las proyecciones climáticas generadas por los modelos de circulación general acoplados es una de las tareas primordiales para cualquier estudio serio sobre impactos del cambio climático en una región determinada. Se conocen dos grandes tipos de técnicas de regionalización: las dinámicas, basadas en el uso de modelos climáticos de área limitada y las estadísticas, fundamentadas en algoritmos estadísticos que utilizan una base histórica climatológica dada.

El presente trabajo utiliza la técnica de Fiabilidad de Ensamble Ponderado para regionalizar las proyecciones climáticas de precipitación, temperatura mínima, media y máxima para México utilizando la información de los 23 modelos de circulación general acoplados (MCGA) que participaron en el 4º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

El producto final son las proyecciones climáticas de las variables arriba mencionadas a una resolución de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  para los escenarios de emisión SRES-A1B y SRES-A2, aunque aquí únicamente se presentan los resultados de éste último. En el caso de la precipitación los cambios se dan de manera porcentual en relación a la climatología base de 1961-1990. Los análisis muestran que las variaciones estacionales proyectadas son lo suficientemente significativas para anticipar que no solo habrá cambios importantes en los valores totales de precipitación y temperatura, sino también en la variabilidad estacional de ambas variables. Así, se estima que estos cambios traerán consigo retos a la forma de adaptarse de los diferentes sectores (agricultura, hidráulico, salud, entre otros) a los diversos cambios en el clima que se avecinan para el presente siglo en nuestra región.

### Introducción

Hoy en día prácticamente todo el mundo ha escuchado acerca de la problemática de calentamiento global debido al incremento antropogénico de los niveles de gases de efecto invernadero que ha llevado a aumentar el efecto invernadero *natural* que mantiene la temperatura global a unos  $15^\circ\text{C}$ . Así, se estima que para las décadas subsecuentes, la temperatura de la superficie media global habrá aumentado entre  $1.8$  y  $4^\circ\text{C}$  para la década de 2090-2099, en comparación con la década 1980-1989. Se espera que el nivel medio del mar aumente entre  $0.18$  y  $0.59$  m durante los periodos mencionados con anterioridad (Solomon *et al.*, 2007).

Los cambios en el clima no se limitan exclusivamente a la temperatura, sino también afectarán otras variables importantes tales como la precipitación,

los vientos y la humedad, entre otros. Uno de los problemas que enfrenta la humanidad es conocer a detalle los cambios esperados en el clima en cada región particular del mundo. Lo anterior se debe a que los modelos de circulación general acoplados (MCGA) que predicen tales cambios tienen resoluciones espaciales muy burdas ( $200 \times 200$  km aproximadamente). De esta forma, en las últimas décadas se han ensayado varias técnicas de regionalización basadas en métodos dinámicos y estadísticos.

En el presente Atlas se muestran los resultados de una técnica de regionalización estadística implementada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua conocida como FEP (Fiabilidad de Ensamble Ponderado) (Montero-Martínez y Pérez-López, 2008). En el trabajo citado los resultados de precipitación se

**Se estima que estos cambios traerán consigo retos a la forma de adaptarse de los diferentes sectores...**



manifestaron en mm/día pero para una mejor interpretación del usuario esta vez se brindan en cambios porcentuales con respecto a la climatología 1961-1990. Asimismo en esta actualización se añaden los resultados ya regionalizados obtenidos para temperatura mínima y máxima.

## Objetivo

El objetivo principal del presente trabajo es mostrar por entidad federativa el cambio estimado para precipitación y temperatura de superficie de acuerdo al escenario SRES-A2 proyectado para el siglo XXI, utilizando la técnica estadística implementada por Montero-Martínez y Pérez-López (2008) conocida como Fiabi.

Los cambios proyectados en precipitación se presentan de forma porcentual y los de temperatura de superficie en grados centígrados (C), ambos en relación al período base 1961-1990.

## Bases de datos

Cualquier técnica de regionalización estadística (como la utilizada aquí) necesita contar con una base de datos climatológicos de buena calidad para poder realizar el proceso de evaluar el desempeño de cada MCGA en reproducir la climatología observada (ya sea de precipitación o temperatura). Así también se requiere considerar toda la información disponible de los MCGA que participaron en el 4° Reporte de Evaluación del IPCC (4RE-IPCC) para precipitación y temperatura. De esta forma, estos fueron los principales datos utilizados:

Datos climatológicos de CRU (*Climate Research Unit* por sus siglas en inglés) para precipitación, temperatura media, mínima y máxima, para el período base 1961-1990. Esta base de datos está dada a una resolución de 0.5° x 0.5° que es la resolución a la cuál se puede llevar a cabo la regionalización de las proyecciones climáticas estimadas por los modelo de circulación general acoplados.

Datos de simulaciones realizadas por los 23 MCGA que participaron en el IV Reporte Especial—IPCC para precipitación, temperatura media, mínima y máxima, en los periodos 1961-1990 (histórico) y 2010-2098 (futuro). Las simulaciones de las proyecciones corresponden al SRES-A2, considerado un escenario de emisiones alto tal y como lo indican las observaciones reales durante la primera década (van Vuuren y Riahi, 2008). Todas las bases de datos de los MCGA fueron interpoladas a resolución de 0.5° x 0.5° usando el algoritmo de

D. Hensen de FNOC (*Fleet Numerical Oceanographic Center's* por sus siglas en inglés), basado en una interpolación bilineal con funciones de tipo Bessel.

## Aplicación del método FEP

Las bases de datos mencionadas anteriormente, se incorporaron al método FEP implementado como método de regionalización para México por Montero-Martínez y Pérez-López (2008). El método FEP es una adaptación del algoritmo REA (Giorgi y Mearns, 2002) para regionalizar datos de MCGA a un área delimitada. Ambos el FEP y el REA toman en cuenta dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo en reproducir el clima actual (criterio de desempeño) y la convergencia de los cambios simulados entre modelos (criterio de convergencia).

El principio de éste método es muy simple. Se calcula la anomalía de precipitación (o de cualquier otra variable climatológica) a través de un ensamble de datos de diferentes MCGA utilizando, como primera aproximación, el promedio de la anomalía proyectada por cada MCGA. El método FEP propone que en lugar de tomar un promedio simple se tome un promedio ponderado del ensamble, asignándoles pesos específicos a cada modelo basándose en los criterios de fiabilidad mencionados anteriormente. El método FEP como tal se describe detalladamente en Montero-Martínez y Pérez-López (2008). Presentamos algunos de los resultados relevantes obtenidos con esta técnica.

## Proyecciones regionalizadas de precipitación y temperaturas mínima y máxima

A continuación se muestran los resultados de las proyecciones climáticas regionalizadas obtenidas con el método FEP. Las observaciones históricas se calcularon directamente de los datos de CRU, los cuáles son ampliamente utilizados por la comunidad científica por llevar consigo un análisis de calidad de datos que otras bases no tienen (Mitchell, 2004). Así, se muestra la climatología estacional observada (1961-1990) para precipitación (mapa 2.1), temperatura mínima (mapa 2.2) y temperatura máxima (mapa 2.3).

Así también se puede ver la variación estacional (invierno y verano) de los cambios esperados en precipitación, de acuerdo al método FEP, para el presente siglo dividido en tres periodos diferentes (mapa 2.4).

mapa 2.4. Cambio porcentual de precipitación proyectado para el invierno (DEF) y verano (JJA) de diferentes periodos del Siglo XXI con respecto a la climatología de 1961-1990.

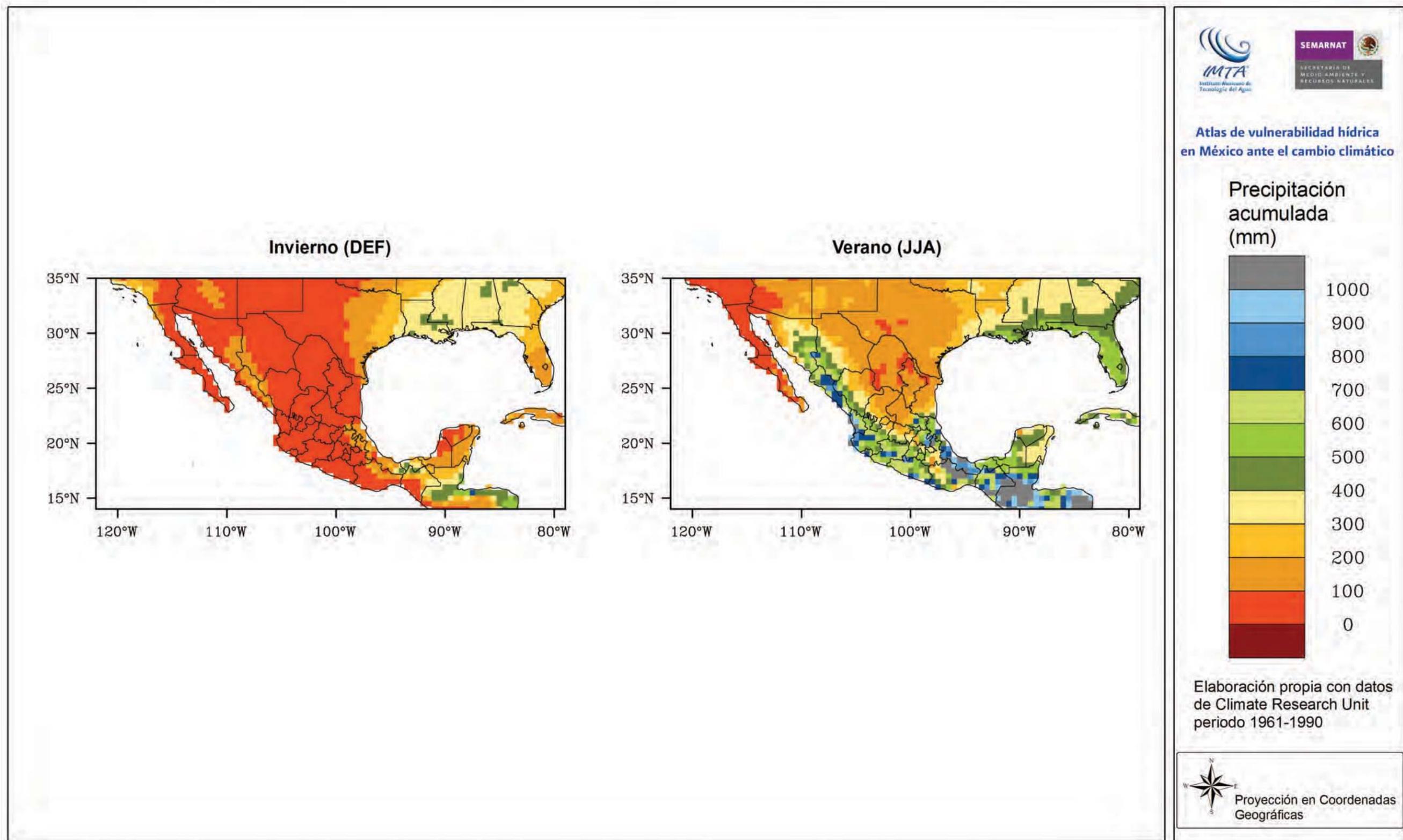
Lo más notable es, sin duda, que a excepción de una pequeña región para el suroeste de Coahuila (en la que se observan cambios positivos de precipitación para el verano), para todo el país se estima un reducción en las precipitaciones totales para el presente siglo.

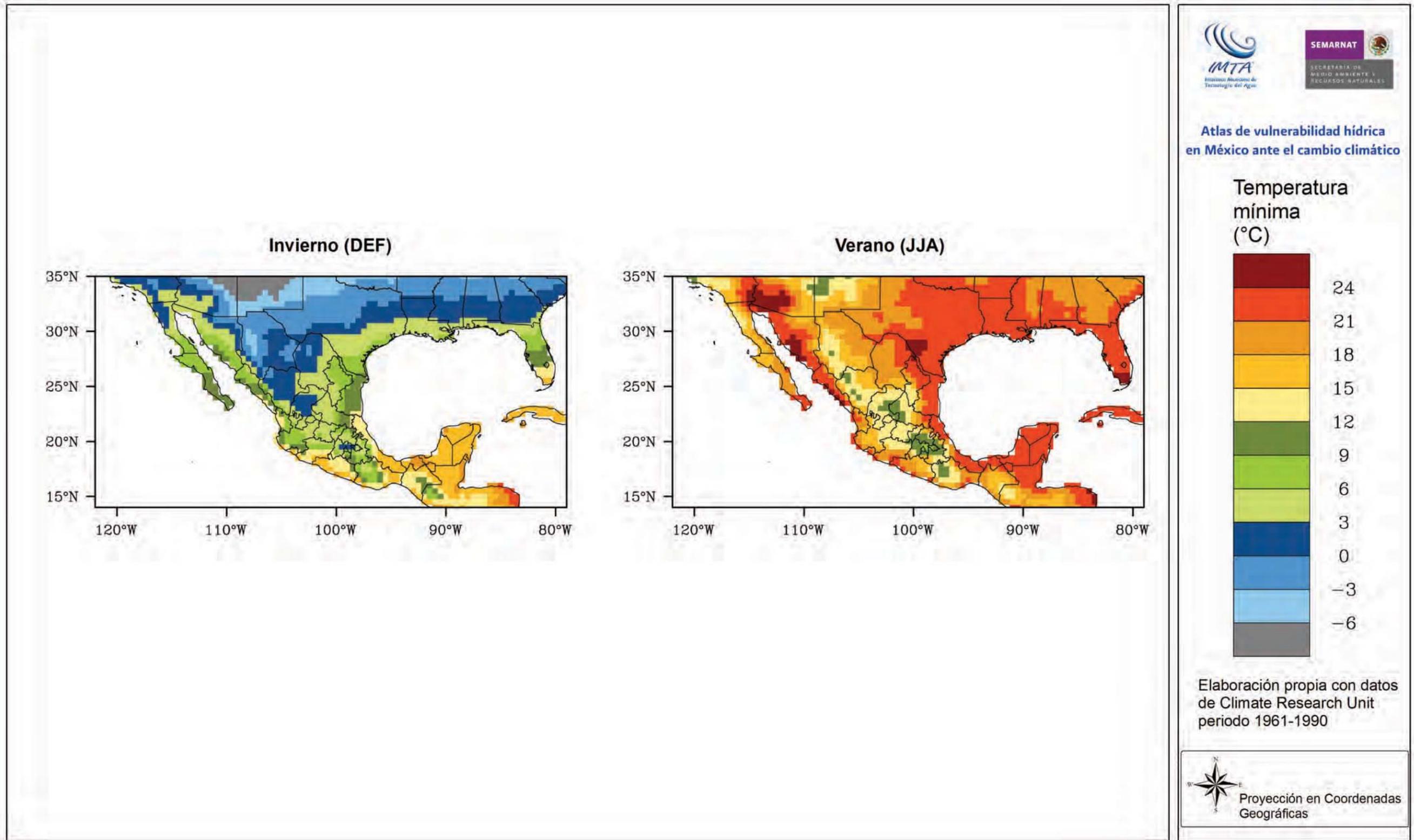
Además, se observa que las proyecciones climáticas de precipitación para el invierno resultan ser más pronunciadas en términos porcentuales que las correspondientes para el verano. También se nota como ciertas regiones experimentan cambios drásticos, en tanto que otras permanecen prácticamente sin cambio significativo. Tal es el caso de la región de Tabasco y norte de Chiapas en donde se observa que prácticamente se mantendrá sin cambio alguno durante el invierno, sin embargo para el verano se esperan cambios que van desde -5 a -10% para el período 2010-2039 hasta -35 a -40% para final del siglo (2070-2098).

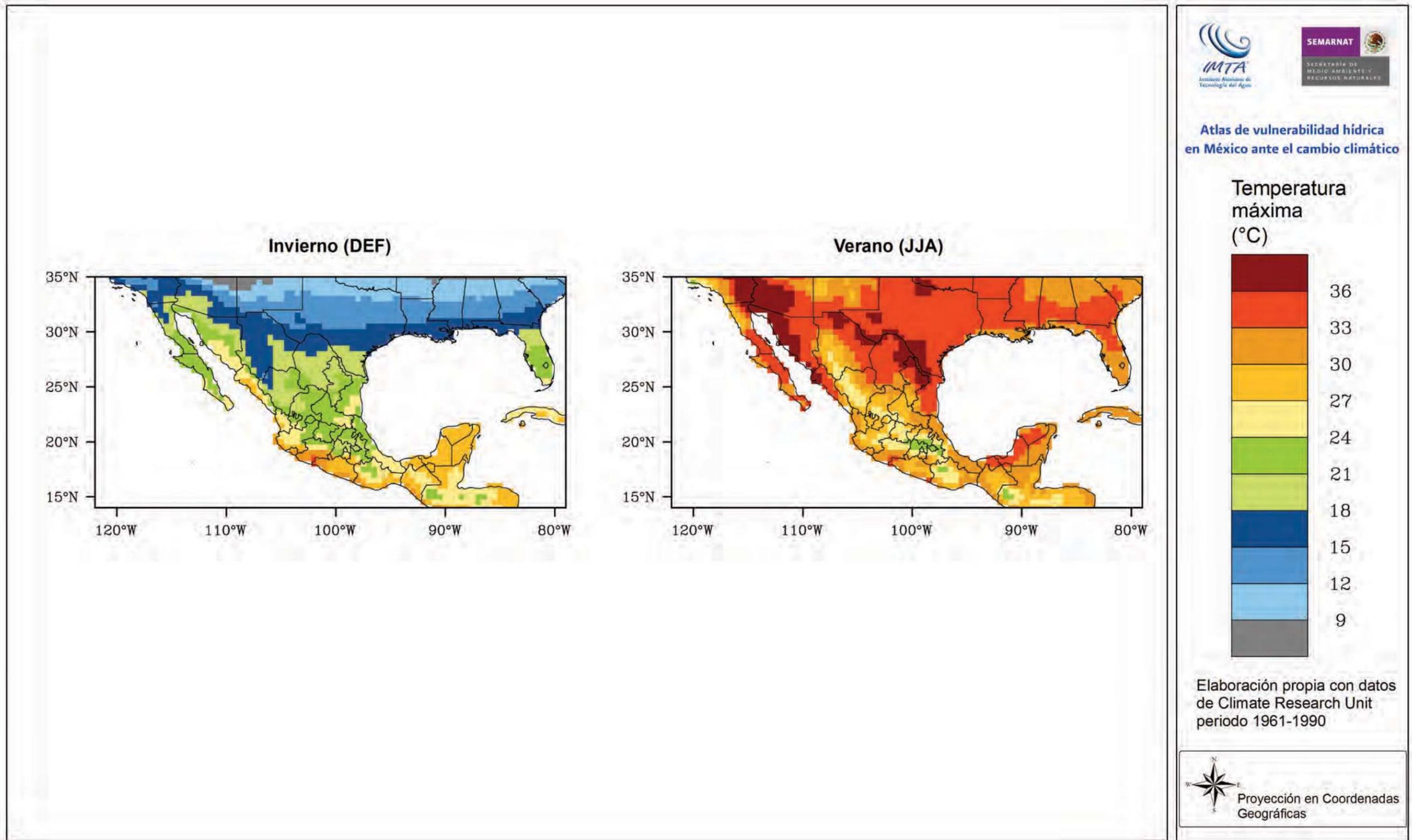
En cuanto a la temperatura de superficie se presentan los mapas que estiman la evolución de las temperatura mínima (mapa 2.5) y máxima (mapa 2.6) durante el presente siglo para las estaciones de invierno y verano. Nuevamente destaca el hecho de que en todos los casos se proyectan cambios positivos (es decir mayor calentamiento) en la temperatura de nuestra región para este siglo que con respecto al pasado inmediato. Se observa también que los cambios en valores de temperatura mínima son en general de menor magnitud que sus correspondientes de temperatura máxima. De igual forma, en general los cambios en verano suelen ser más grandes que los de invierno para ambas temperaturas. Los valores de cambio máximos en temperatura máxima sobrepasan los 5 °C para algunas zonas muy locales en el centro del país durante el verano y hacia finales de siglo (mapa 2.6).

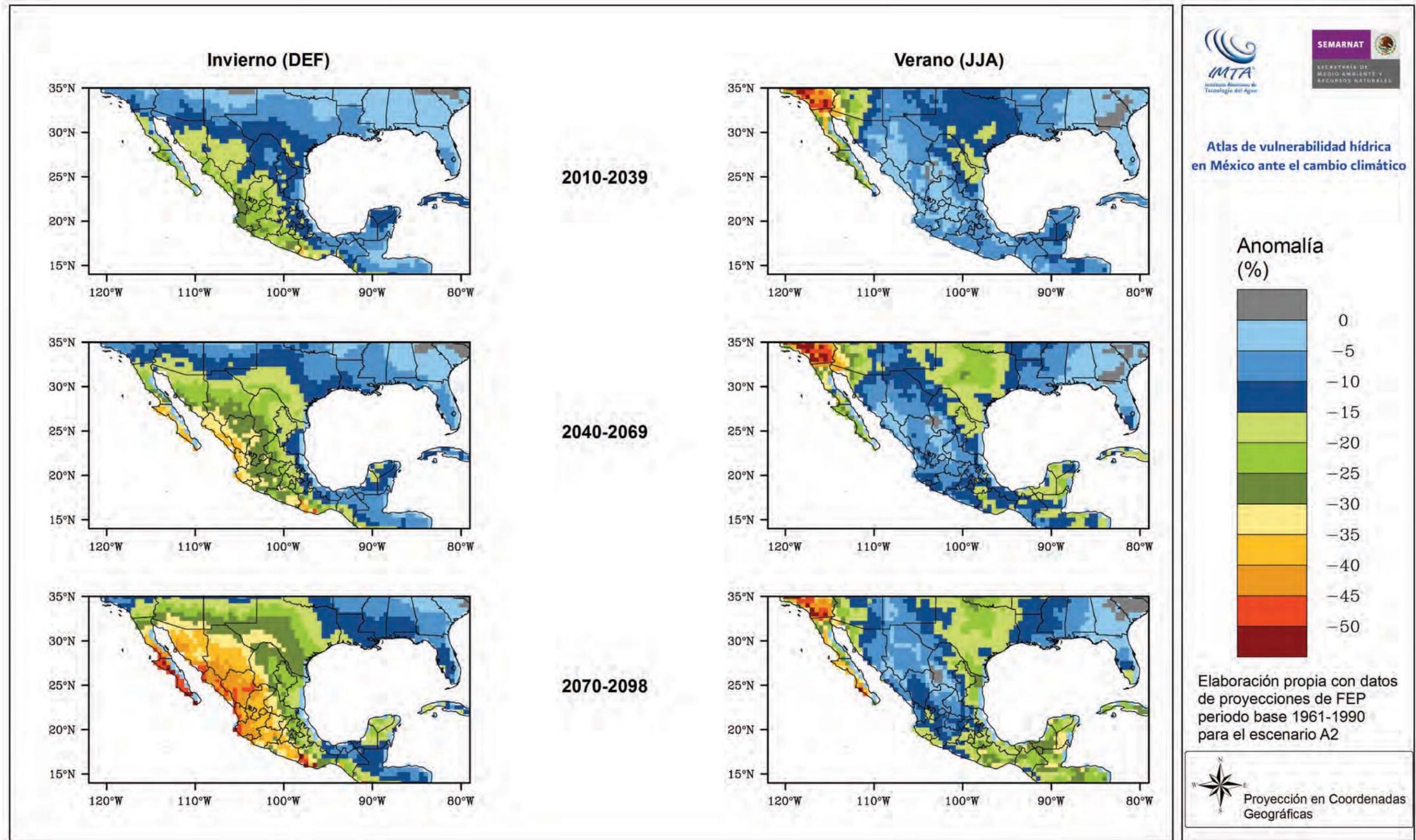
## Análisis comparativo de la climatología observada de precipitación por entidad federativa y sus valores esperados cien años después

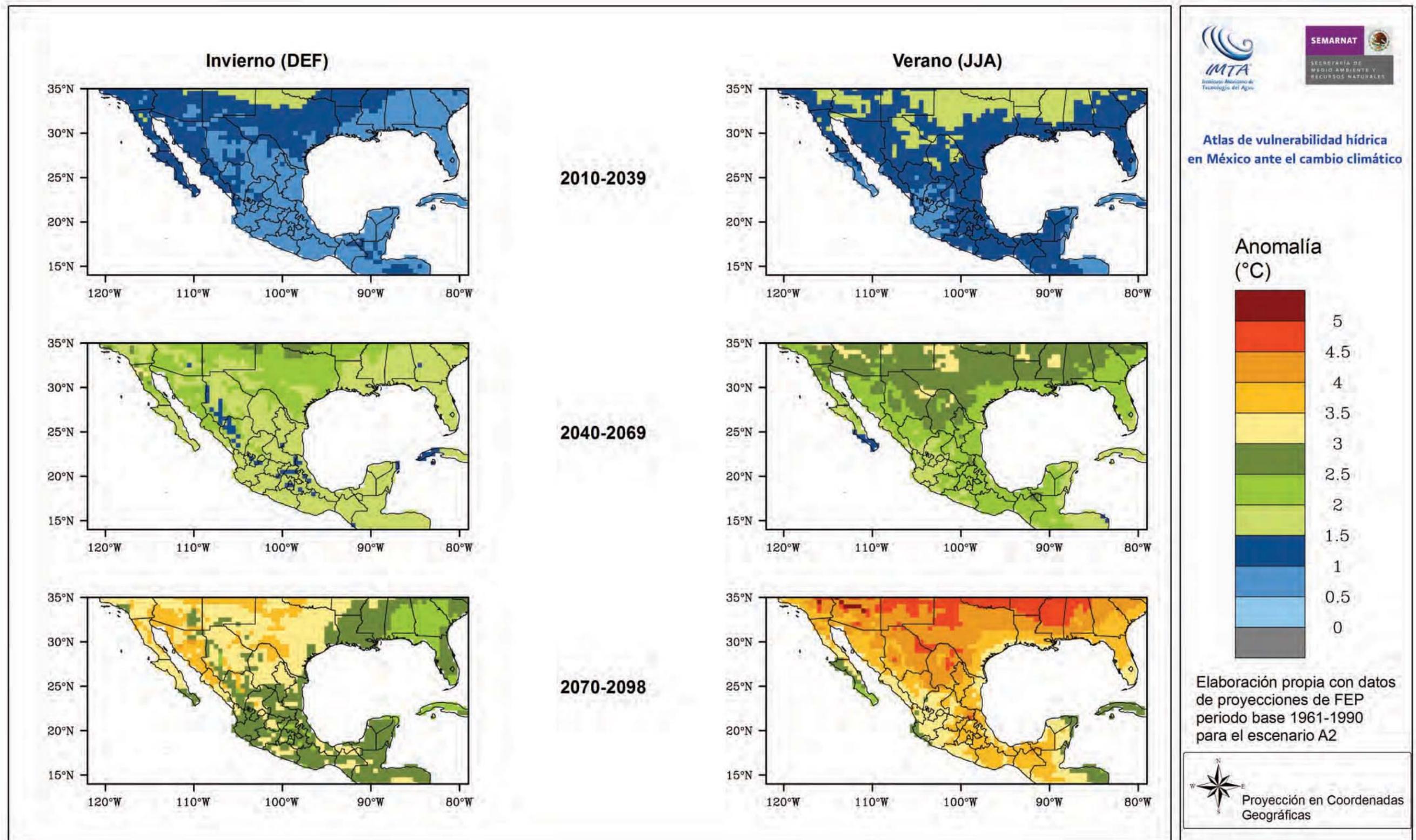
Con el fin de presentar en forma concreta el significado y relevancia de llevar a cabo la regionalización de proyecciones climáticas para el presente siglo se muestran los cambios porcentuales de precipitación para cada entidad federativa del país en relación a las mediciones reales (de acuerdo a CRU) durante el período 1961-1990 (cuadro 2.1).

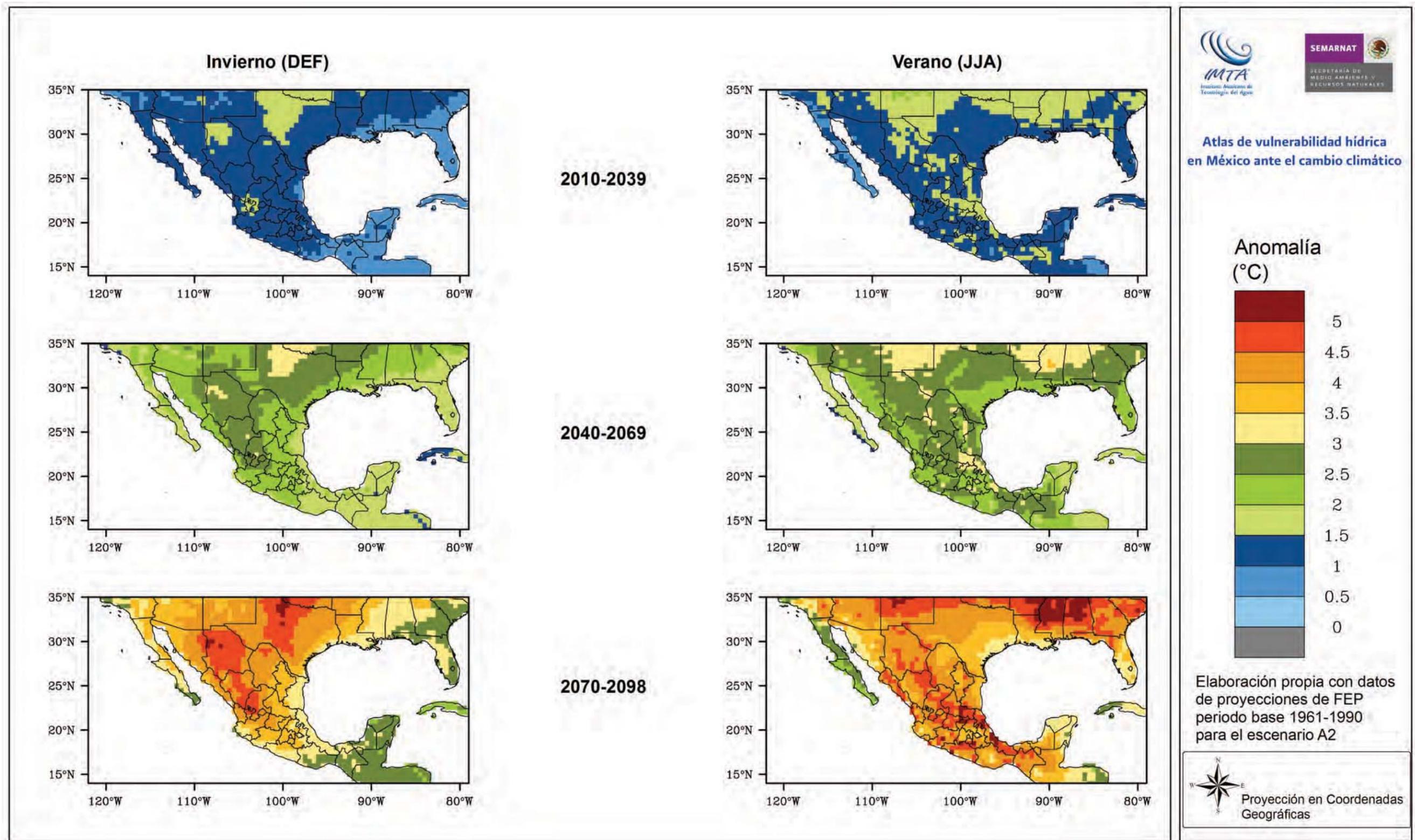












**Cuadro 2.1. Precipitación promedio observada (en mm totales) por entidad federativa durante el invierno (Dic-Ene-Feb), verano (Jun-Jul-Ago) y anual, así como, el cambio respectivo esperado (en %) cien años después bajo el escenario SRES-A2.**

	Entidad federativa	Precipitación Obs 1961-90 (mm)			Cambio proyectado al 2061-90 (%)		
		Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano	Anual
1	Aguascalientes	34.95	241.98	441.39	-22.20	-6.53	-13.00
2	Baja California	48.61	34.06	138.84	-28.70	-13.80	-21.28
3	Baja California Sur	54.30	129.78	276.83	-28.73	-18.10	-18.01
4	Campeche	120.33	512.86	1238.76	-13.83	-28.09	-17.61
5	Coahuila	38.66	127.89	344.73	-12.64	-19.90	-12.92
6	Colima	52.14	580.65	990.72	-24.68	-7.07	-14.43
7	Chiapas	224.76	914.86	2181.72	-16.40	-7.91	-12.45
8	Chihuahua	50.35	230.91	416.45	-20.48	-15.25	-14.24
9	Distrito Federal	25.00	425.50	790.49	-20.14	-12.82	-12.86
10	Durango	39.21	259.53	449.70	-28.06	-8.69	-15.59
11	Guanajuato	29.76	347.54	602.33	-21.12	-7.04	-12.30
12	Guerrero	18.29	616.08	1050.37	-18.54	-12.65	-11.86
13	Hidalgo	105.62	562.12	1312.86	-18.22	-13.05	-13.25
14	Jalisco	37.00	522.38	822.83	-22.73	-12.48	-14.45
15	México	30.09	468.44	842.08	-21.49	-12.68	-13.05
16	Michoacán	30.52	579.05	948.76	-20.70	-11.68	-12.84
17	Morelos	20.47	539.00	937.45	-20.69	-13.76	-12.84
18	Nayarit	53.04	645.01	991.54	-28.37	-10.82	-16.28
19	Nuevo León	51.70	195.95	550.43	-13.28	-11.02	-12.72
20	Oaxaca	75.03	711.62	1349.60	-17.57	-19.01	-13.67
21	Puebla	74.71	556.22	1193.57	-15.96	-16.38	-13.18
22	Querétaro	35.73	347.74	704.47	-19.40	-10.04	-12.45
23	Quintana Roo	162.06	465.06	1266.51	-13.11	-29.26	-17.65
24	San Luis Potosí	45.46	314.13	658.08	-16.81	-6.80	-11.30
25	Sinaloa	106.04	516.21	869.13	-31.58	-9.55	-17.05
26	Sonora	70.90	194.45	370.83	-28.47	-20.15	-21.26
27	Tabasco	324.92	672.62	2043.22	-10.95	-27.04	-16.18
28	Tamaulipas	63.27	245.53	659.88	-14.06	-18.05	-14.88
29	Tlaxcala	34.00	336.01	733.51	-16.78	-15.62	-12.37
30	Veracruz	189.74	723.22	1758.00	-12.82	-19.96	-13.93
31	Yucatán	110.26	419.94	1014.80	-16.65	-26.81	-18.87
32	Zacatecas	34.08	241.92	434.61	-23.07	-6.33	-13.13
	NACIONAL	73.42	368.95	772.56	-20.00	-15.76	-15.15

Los resultados anteriores se ilustran geográficamente en los mapas 2.7-2.9 para precipitación observada de invierno, verano y anual, respectivamente; mientras que los mapas 2.10-2.12 presentan el cambio proyectado en precipitación de manera porcentual cien años después.

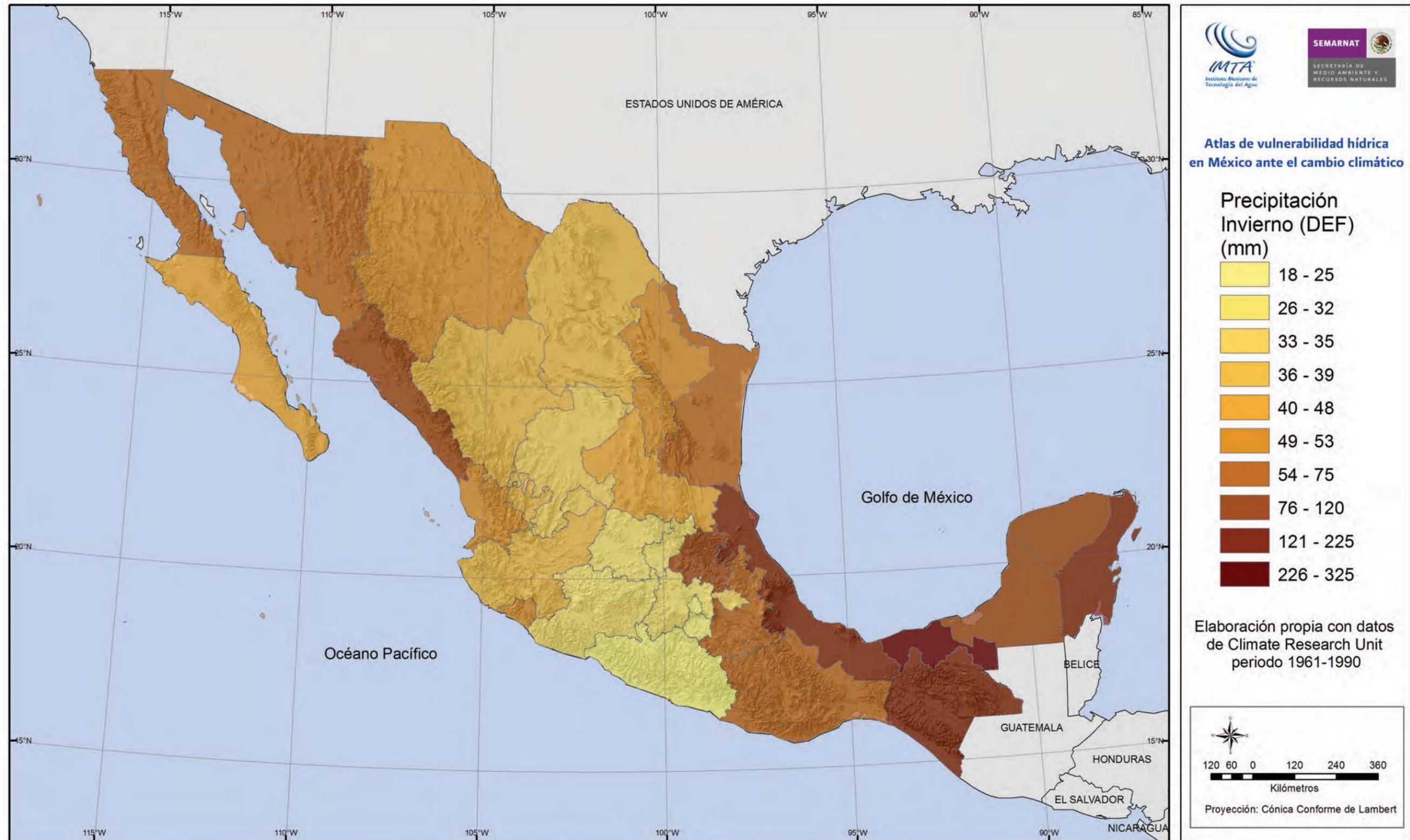
Las características típicas de la climatología de precipitación en el país se notan en los resultados de este trabajo. En primer término, para el invierno se nota que los estados con mayor precipitación se encuentran en sur y en el sureste y en segundo plano los del noroeste, siendo la influencia de la actividad de frentes fríos la principal causa de estas lluvias (mapa 2.7). Para el verano, los estados del sur son los que captan mayor precipitación y, en segundo plano, los estados de los litorales del Pacífico centro y sur y del Golfo de México (mapa 2.8). La precipitación anual está distribuida de forma muy parecida a la de verano, notándose claramente la influencia de la temporada de lluvias del país (mapa 2.9).

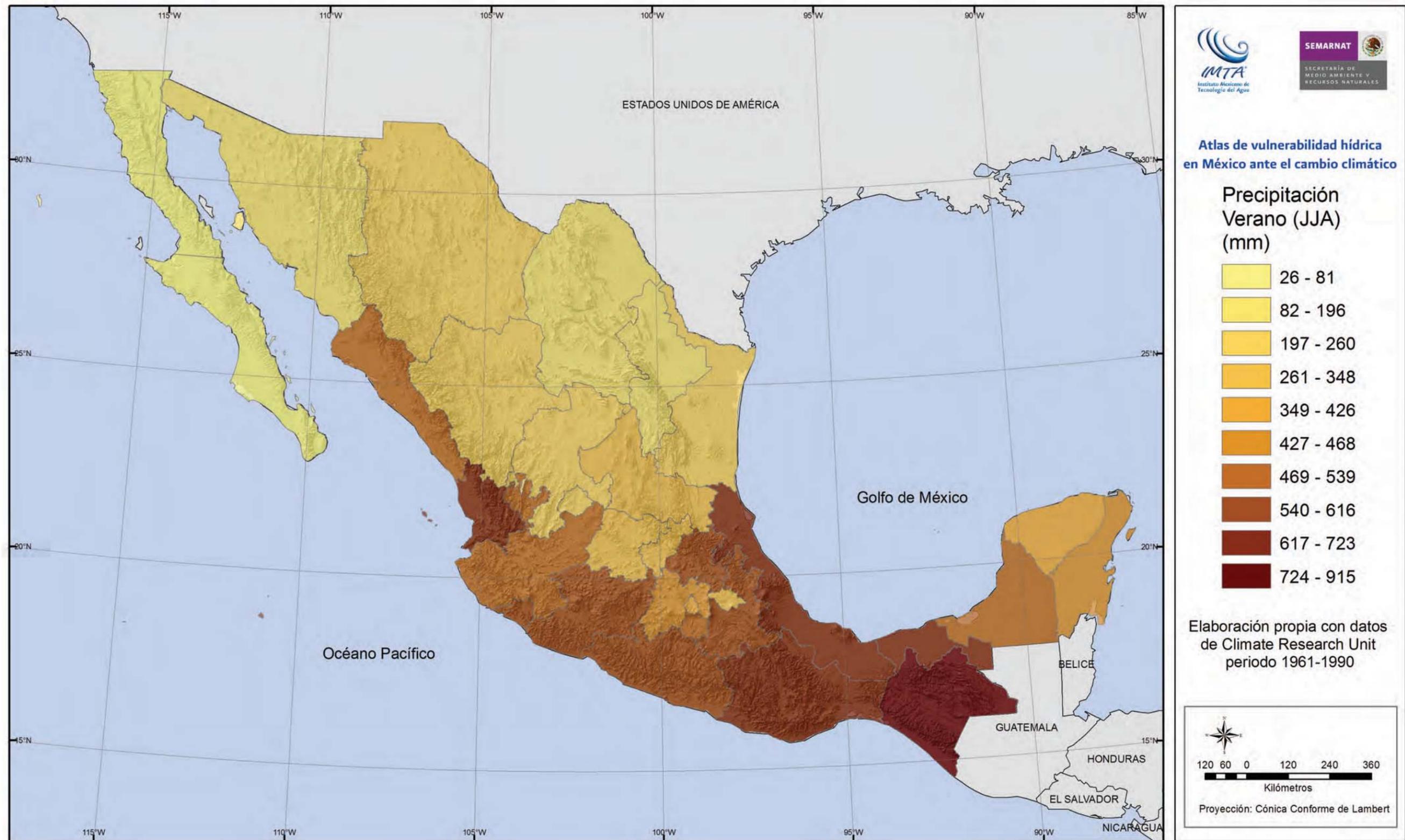
En cuanto a las proyecciones climáticas regionalizadas de precipitación para finales del presente siglo (2061-2090) se espera que para el invierno los estados que sufran mayor descenso de precipitación son los del noroeste, con reducciones alrededor de 30% en relación al período correspondiente cien años atrás (mapa 2.10). Para el verano el mayor decremento se da en los estados del sureste con valores cercanos a -30% con respecto al período base (mapa 2.11). Finalmente, los promedios anuales de las proyecciones de precipitación señalan que son dos estados del noroeste, Sonora y Baja California, los que tendrán el mayor decremento en precipitación anual con valores de 21% con respecto a la climatología base, en segundo plano se encuentran los estados de la península de Yucatán; se estima que los estados que se ubican el centro del país y Chiapas son los que tendrán menor reducción en la precipitación anual con valores alrededor de -1.3% (mapa 2.12).

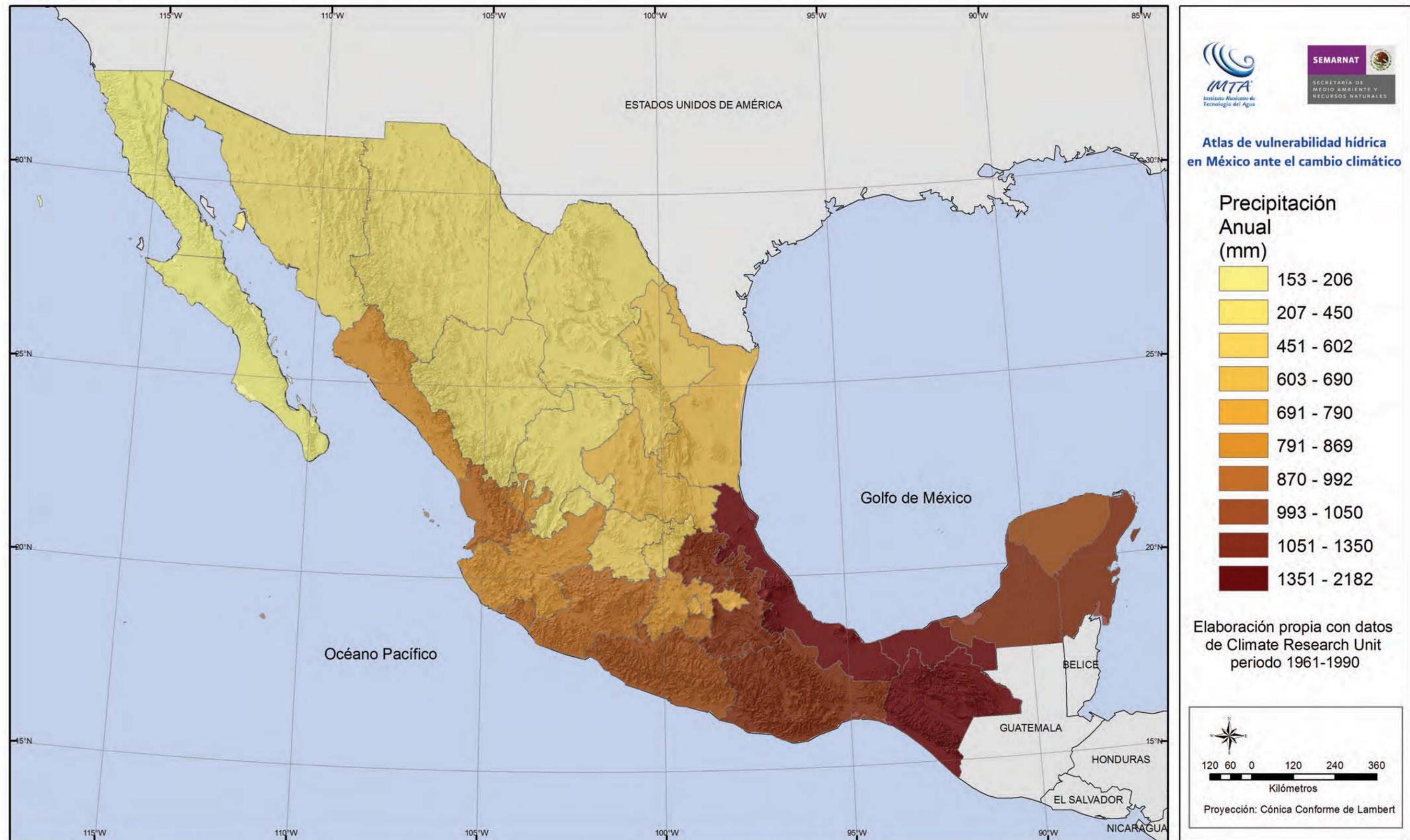
## Análisis comparativo de la climatología observada de temperatura media de superficie por entidad federativa y sus valores esperados cien años después

Es indudable que la variable climatológica más utilizada para mostrar los posibles efectos del incremento en los niveles de gases invernadero es la temperatura de superficie. En el cuadro 2.2 se presentan los pronósticos por entidad federativa del cambio estimado en la temperatura media en el período del 2061-2090 con respecto a la observada en el período 1961-1990 bajo el escenario SRES-A2.

De la misma forma que para precipitación, los resultados gráficos de el cuadro 2.2 se presentan en los mapas 2.13-2.15 para temperatura media observada y los mapas 2.16-2.18 muestran los cambios esperados en temperatura media (C), cien años después del período base 1961-1990.













**Cuadro 2.2. Temperatura media promedio observada (en °C) por entidad federativa durante el invierno (Dic-Ene-Feb), verano (Jun-Jul-Ago) y anual, así como el cambio respectivo esperado cien años después bajo el escenario SRES-A2.**

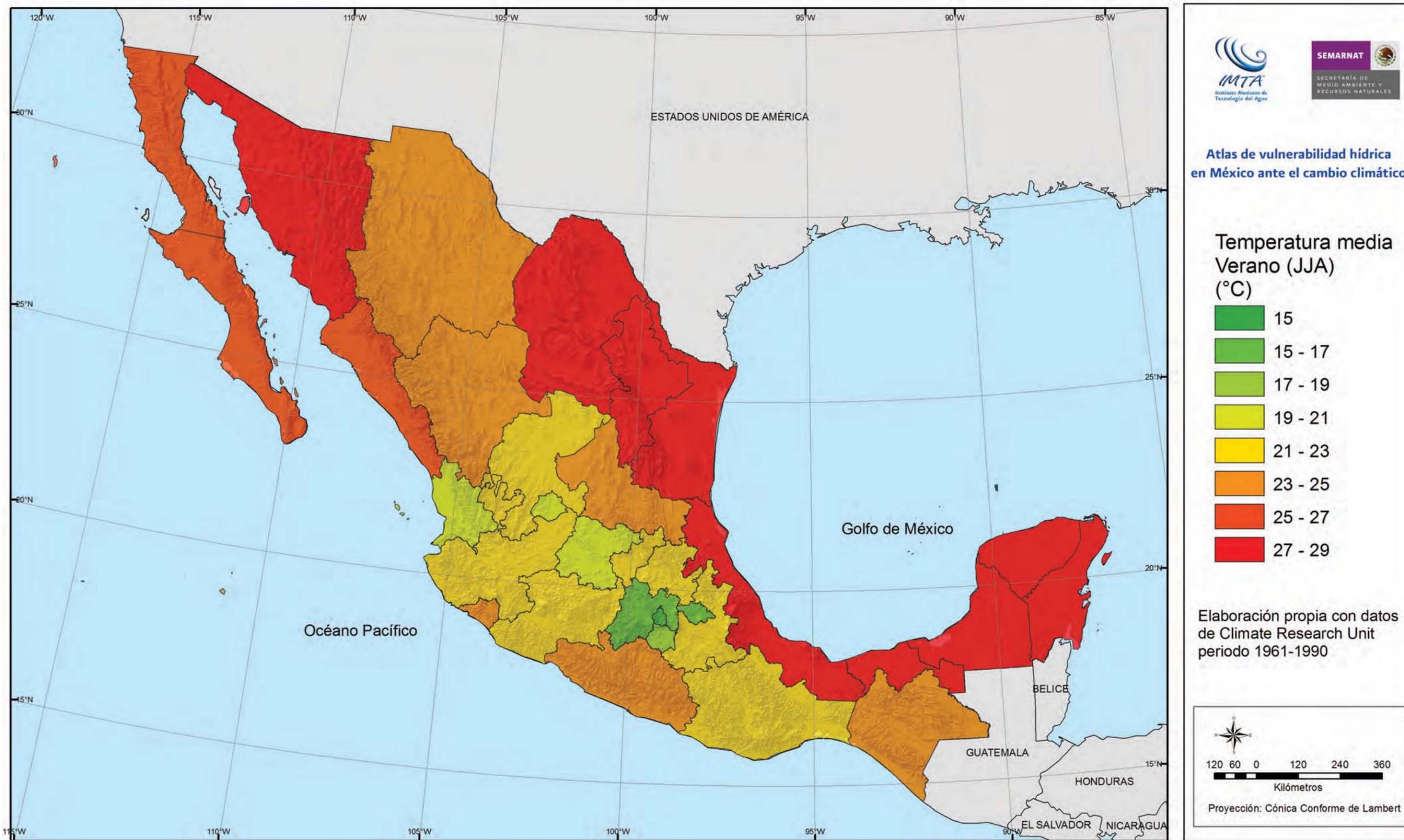
	Entidad federativa	Temp media observada 1961-90 (°C)			Cambio proyectado al 2061-90 (C)		
		Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano	Anual
1	Aguascalientes	13.13	20.00	17.16	+3.35	+3.38	+3.45
2	Baja California	13.47	28.35	20.74	+2.90	+2.75	+2.90
3	Baja California Sur	16.30	26.48	21.48	+2.47	+2.25	+2.34
4	Campeche	22.97	27.73	25.96	+2.57	+3.62	+3.09
5	Coahuila	11.55	27.60	20.04	+2.72	+3.84	+3.28
6	Colima	19.52	23.63	22.06	+3.34	+3.83	+3.76
7	Chiapas	21.01	24.42	23.23	+3.15	+3.86	+3.69
8	Chihuahua	8.94	24.87	17.12	+2.79	+2.73	+2.83
9	Distrito Federal	11.12	15.16	13.67	+2.85	+3.00	+3.09
10	Durango	11.86	23.05	17.90	+3.24	+3.40	+3.50
11	Guanajuato	14.58	20.41	18.15	+3.11	+3.32	+3.35
12	Guerrero	21.37	23.90	23.29	+2.70	+3.06	+2.94
13	Hidalgo	15.45	21.25	18.93	+2.74	+3.47	+3.25
14	Jalisco	15.80	21.52	19.24	+3.09	+2.99	+3.14
15	México	12.39	16.56	15.03	+2.94	+3.01	+3.16
16	Michoacán	18.13	22.08	20.79	+2.96	+3.04	+3.09
17	Morelos	15.29	18.41	17.42	+2.75	+3.24	+3.09
18	Nayarit	17.34	24.03	21.05	+3.21	+3.32	+3.46
19	Nuevo León	15.03	27.21	21.60	+2.85	+3.64	+3.43
20	Oaxaca	18.95	22.40	21.24	+2.74	+3.45	+3.11
21	Puebla	16.30	21.02	19.30	+2.71	+3.40	+3.16
22	Querétaro	15.67	22.00	19.48	+2.83	+3.58	+3.35
23	Quintana Roo	23.08	27.50	25.69	+2.26	+2.77	+2.51
24	San Luis Potosí	15.46	22.99	19.83	+2.81	+3.53	+3.36
25	Sinaloa	16.60	26.57	21.99	+2.94	+3.14	+3.14
26	Sonora	12.54	27.78	20.13	+3.30	+3.59	+3.57
27	Tabasco	23.55	28.21	26.45	+2.63	+4.09	+3.35
28	Tamaulipas	17.07	28.70	23.52	+2.61	+3.37	+3.13
29	Tlaxcala	11.71	15.59	14.20	+2.71	+3.15	+3.10
30	Veracruz	20.70	27.03	24.45	+2.57	+3.74	+3.20
31	Yucatán	22.76	27.77	25.71	+2.23	+2.69	+2.48
32	Zacatecas	12.64	21.33	17.51	+3.23	+3.36	+3.47
	<b>NACIONAL</b>	15.39	24.99	20.60	+2.85	+3.27	+3.15

Mediante estos resultados se confirma que los estados más calurosos durante el invierno son los del sureste, en tanto que el estado más frío es Chihuahua (mapa 2.13).

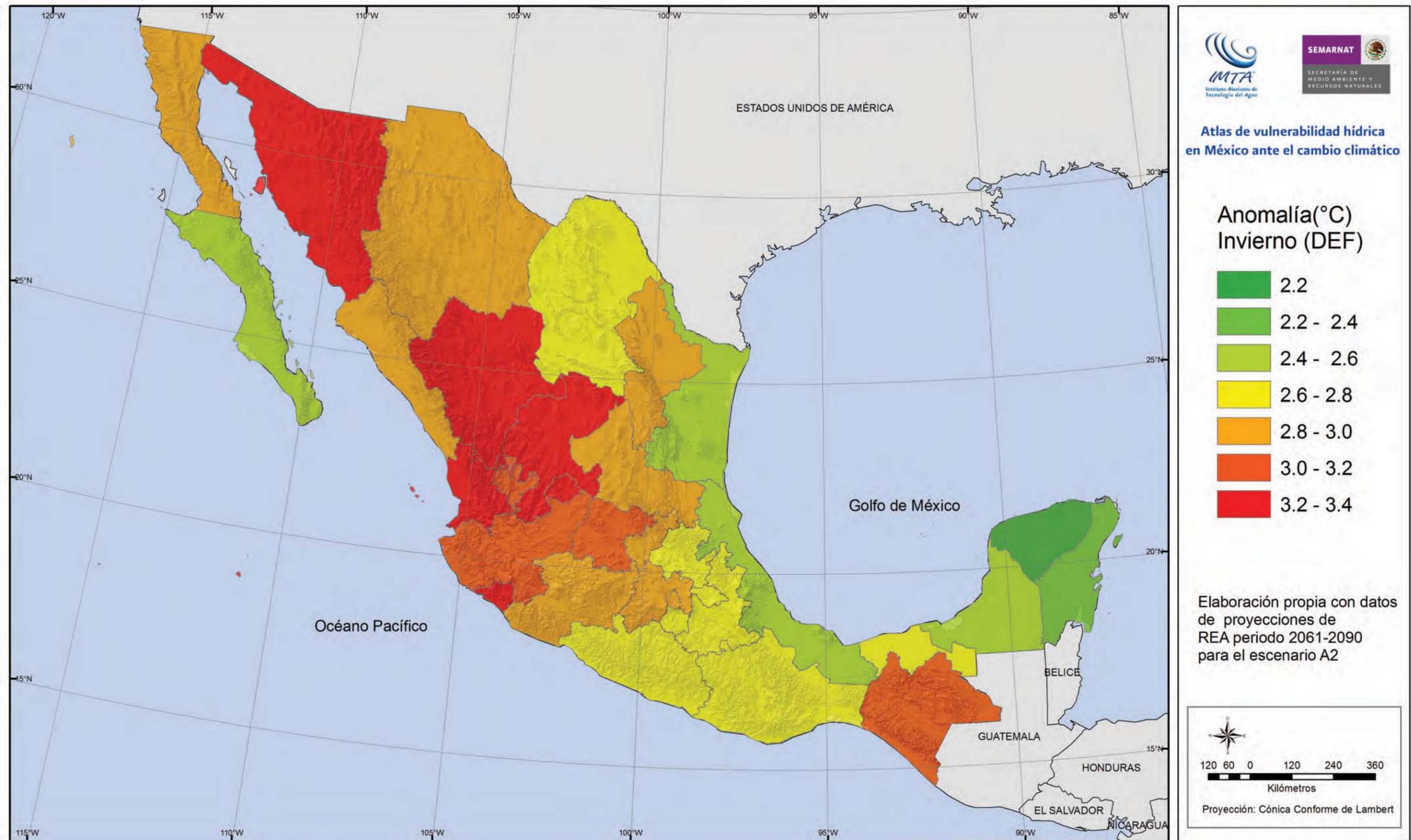
Para el verano las mayores temperaturas medias se encuentran en los estados del noroeste, noreste y sureste, en tanto que las temperaturas medias más bajas se dan en los estados del centro (mapa 2.14). Finalmente, como promedio anual es el estado más caluroso resulta ser Tabasco y los estados de la península de Yucatán (mapa 2.15).

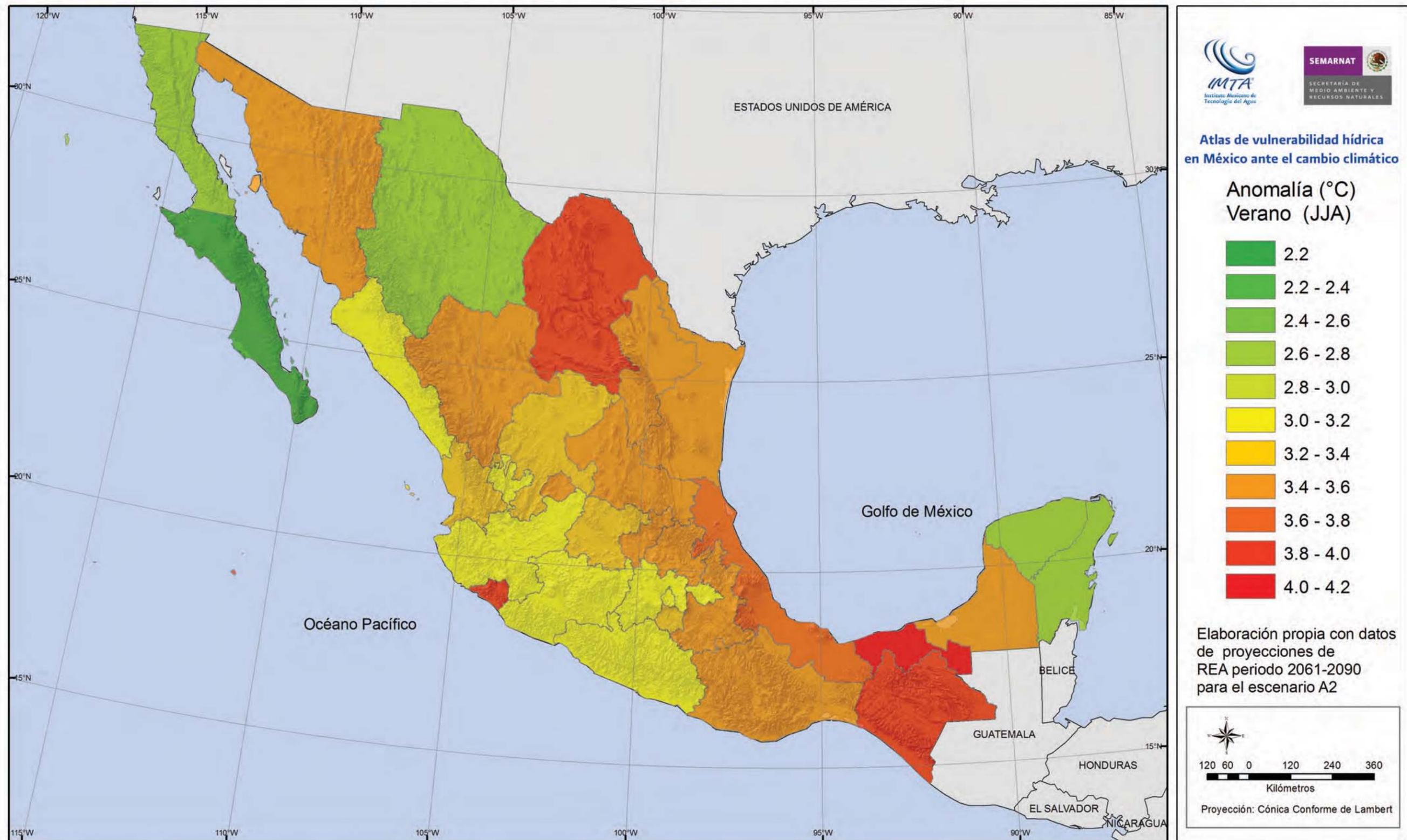
Por otro lado, los estados con mayor anomalía de temperatura proyectada durante el invierno son Aguascalientes, Colima y Sonora con valores de al menos +3.3 °C con respecto a la climatología base (mapa 2.16). Para el verano, las mayores anomalías se encuentran en Tabasco (¡con anomalía arriba de los +4 °C), Chiapas, Coahuila y Colima (mapa 2.17). Finalmente, como promedio anual, se espera que los estados que más calentamiento experimenten sean Colima, Chiapas, y Sonora, con valores por arriba de 3.5 °C, en tanto que Baja California Sur es el estado que experimentará menor incremento de temperatura (mapa 2.18).













## Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio deja entrever la importancia de las variaciones climáticas específicas en términos de la futura gestión hídrica, obtenidas mediante la regionalización de la información típica proveniente de los MCGA para las proyecciones climáticas de variables como precipitación y temperatura. Se ha mostrado que considerar los comportamientos estacionales será muy importante, como el caso de las lluvias invernales que en general experimentarán un mayor decremento (porcentual) que las lluvias de verano. No obstante, dado que la mayor precipitación en México ocurre durante el verano. Por otro lado, se ha corroborado que los incrementos en la temperatura máxima serán mayores que en la temperatura mínima, además que las zonas de mayor incremento de una y otra son muy diferentes.

Es importante hacer notar que si bien la precipitación promedio anual puede disminuir, ello no significa que no puedan ocurrir fenómenos locales de lluvia más intensa. De hecho, diversos estudios del IPCC (2008) indican que uno de los efectos del cambio climático será precisamente la ocurrencia más frecuente de precipitaciones intensas. El pronóstico de este efecto es complejo, y permanece como una tarea a realizar.

En el futuro estas proyecciones de clima obtenidas por métodos estadísticos deberán ser precisadas y actualizadas con nueva información, como en el presente caso y con métodos dinámicos (valiéndonos de sistemas anidados con modelos de área limitada) de manera tal que gradualmente se obtenga una mayor fiabilidad en las estimaciones de los MCGA y los métodos de regionalización. El tipo de proyecciones climáticas de alta resolución son imprescindibles para cualquier estudio formal de impacto climático en cualquier sector, como la presentación en este texto y para la construcción de políticas de adaptación al cambio climático.

## Referencias

- Giorgi, F. y L.O. Mearns, 2002. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) method, *J. Climate*, 15, 1141-1158.
- IPCC (2008). "El Cambio Climático y el Agua". Bates B., Kundzewicz Z. W., WWS., Palutikof J. (Eds.) Documento Técnico del IPCC. Ginebra. 224 pp.
- Mitchell T.D., An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. Submitted in 2004.
- Montero-Martínez, M.J. y J.L. Pérez-López, Regionalización de proyecciones de precipitación y temperatura en superficie 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, ISBN: 978-607-7563-01-3, 118 pp., IMTA, México, pp. 11-21, 2008.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood y D. Wratt, "Technical Summary, *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 y H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge y Nueva York, 2007.
- VanVuuren, D.P. y K. Riahi, Do recent emission trends imply higher emissions forever?. *Climatic Change* 91: 237-248. doi:10.1007/s10584-008-9485-y, 2008.
- IPCC (2008) "El Cambio Climático y el Agua" Bates B., Kundzewicz Z. W., Wu and Palutikof J. (Eds.). Documento técnico del IPCC. Ginebra. 224 págs.

## Agradecimientos

En el presente trabajo agradecemos la valiosa contribución de la L.C.A. Nury Pavón González, quién colaboró en la obtención de las proyecciones climáticas a nivel estatal; asimismo, al M. en C. Alberto Balancán Soberanis por su apoyo en la elaboración de los mapas, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su apoyo en la coordinación general del documento.

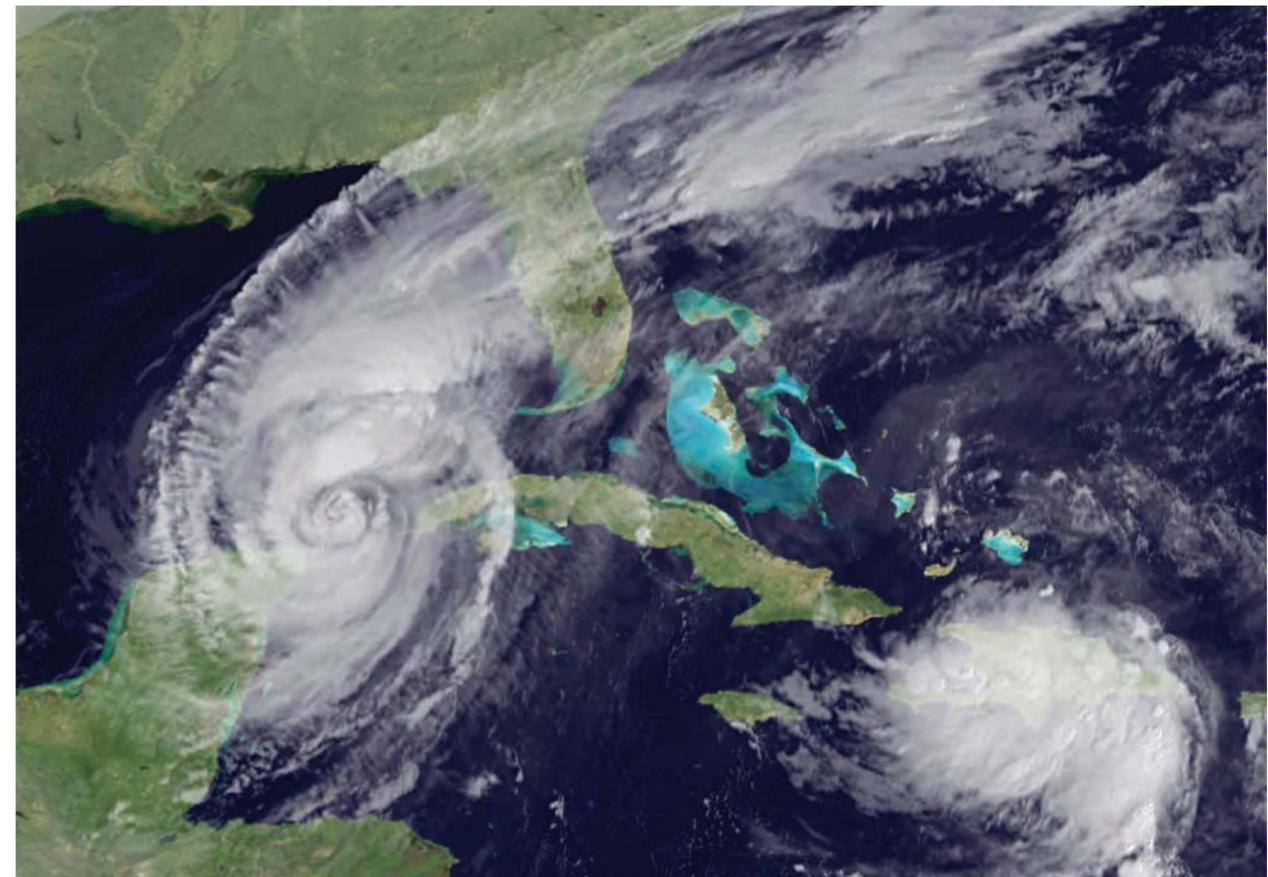






## **Capítulo 3. Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México**

*Ricardo Prieto González, Roberto Ramírez Villa, Virginia Edith Cortés Hernández y María Eugenia Maya Magaña*





## Capítulo 3. Impacto del cambio climático en la temporada de lluvias y ciclones tropicales en México

### Resumen

Con el propósito de identificar el riesgo actual que existe ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales en cada uno de los estados de la república mexicana, se calculó un índice de riesgo numérico que combina factores de amenaza y vulnerabilidad. El rango del índice de riesgo va desde 1 hasta 8, y se ha identificado al estado de Chihuahua como el de menor riesgo con un índice de 1.77, mientras que los estados con mayor riesgo son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán con índices de 6.98, 6.75, 6.50 y 6.11, respectivamente.

Con la ayuda de resultados del modelo japonés de clima de alta resolución, se calculó la precipitación sobre la república mexicana para el período de referencia (1979-2003) y para los periodos 2015-2039 y 2075-2099 en el escenario climático A1B, determinando las anomalías de precipitación sobre el país durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales. Los resultados muestran que regiones costeras de México (especialmente las que colindan con el Océano Pacífico) son susceptibles de un aumento en la precipitación durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales, mientras que amplias zonas del interior muestran una disminución.

Para determinar la variabilidad de la presión mínima y del viento máximo en superficie que se asocia a la actividad de ciclones tropicales, se escogieron dos regiones: el Océano Pacífico del noreste y el Océano Atlántico del noroeste. Los resultados muestran que sobre la primera región existe una intensificación de los eventos extremos de viento, mientras que en la segunda las intensidades se mantienen dentro de los rangos del período de referencia.

### Introducción

La república mexicana recibe una media anual de precipitación acumulada de 770 mm; gran parte de ella ocurre, de mayo a noviembre, asociada a sistemas meteorológicos como las ondas del este, ciclones tropicales, desprendimientos de la zona de convergencia intertropical, frentes fríos, el monzón de Norteamérica, además de sistemas convectivos de menor escala que se desarrollan localmente por forzamiento orográfico.

Las lluvias provocadas por el ingreso de ciclones tropicales, en cualquiera de sus etapas (depresión, tormenta tropical o huracán), adquieren suma importancia debido a su carácter de tipo torrencial, concentrándose en pocas horas o días y generando inundaciones, deslizamientos de tierra, de lodo y de rocas, causando afectaciones a la población y a la economía. Su impacto puede ser local, regional e incluso nacional. Sin embargo, debido al cambio climático, se espera que la intensidad de dichos eventos se modifique, por lo cual es importante considerar escenarios de cambio climático que permitan estimar la magnitud y tendencia de dichas variaciones, con el fin de prevenir posibles consecuencias adversas.

### Los huracanes Stan (2005) y Alex (2010)

El 1 de octubre de 2005 se originó Stan como depresión tropical sobre aguas del mar Caribe, su desplazamiento fue hacia el oeste, cruzó la península de Yucatán y, justo antes de ingresar nuevamente al territorio mexicano por el sur de Veracruz, alcanzó la categoría 1 en la escala de huracanes Saffir-Simpson; posteriormente se disipó el 5 de octubre de 2005 sobre la región del istmo de Tehuantepec. Las precipitaciones que generó a su paso fueron de tipo torrencial, en especial en Veracruz y Chiapas, por ejemplo, el 4 de octubre se registró un acumulado de 307 mm en la estación El Novillero, Chiapas y el 5 de octubre en El Tejar, Veracruz, se registraron 357.5 mm. Las consecuencias de estas precipitaciones en Chiapas fueron considerables, principalmente en la región del Soconusco, donde se desgajaron cerros, se desbordaron varios ríos afectando seriamente a la población con pérdidas humanas, heridos y damnificados.

En el 2010 el huracán Alex presentó un desarrollo muy similar a Stan. Se inició también como depresión tropical sobre aguas del mar Caribe, cruzó la



Figura 3.1 Imagen de satélite del huracán Alex (cortesía NASA). Daños provocados por las lluvias de Alex en Monterrey (cortesía de la Comisión Nacional del Agua).

península de Yucatán e ingresó al Golfo de México, donde se fortaleció hasta alcanzar la categoría 2 en la escala Saffir-Simpson para, posteriormente, ingresar a Tamaulipas durante la noche del 30 de junio. Alex se disipó sobre San Luis Potosí la noche del 1 de julio. Las precipitaciones acumuladas a su paso dejaron 316.1 mm en Valle Hermoso, Tamaulipas, para el 30 de junio, y 389.3 mm en La Boca, Nuevo León, para el 1 de julio (mapa 3.1). En esos dos días, las estaciones del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey registraron precipitaciones acumuladas entre 388 y 510 mm (cuadro 3.1), cuya magnitud es similar a la del valor promedio de precipitación que se acumula en un año. Los daños provocados por Alex abarcaron principalmente a Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, con afectaciones tanto en la población, vías de comunicación, industrias, transporte y actividades económicas.

**Cuadro 3.1. Datos de precipitación acumulada (mm) desde las ocho horas del 30 de junio hasta las 22:20 horas del 1 de julio del 2010, de nueve estaciones del Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey, Nuevo León.**

Sistema de Alerta Hidrometeorológica de Monterrey		
Estación	Clave	Precipitación acumulada (mm)
San Martín	SM-01	388.50
Mitras	MI-02	394.00
Cd. Universitaria	CU-03	328.75
Fierro	FE-04	453.00
Obispo	OB-05	463.00
Arroyo Seco	AS-06	588.00
Estanzuela	EZ-07	853.00
Protección Civil	PC-08	614.50
Obispo	OB-05	510.34

## Lluvias durante la temporada ciclónica

Por la latitud en que se encuentra, México es afectado por sistemas meteorológicos de latitudes medias, por sistemas tropicales y por la interacción entre ellos. Adicionalmente, existen otros factores importantes como la topografía, el uso de suelo y el efecto de las condiciones oceánicas. La combinación de todos estos factores a lo largo de treinta años se conoce como clima regional. Como resultado, en México se cuenta con una gran variedad de climas, entre otros: cálidos subhúmedos, templados subhúmedos, secos y muy secos.

Aunque en algunas regiones llueve prácticamente todo el año, la temporada de lluvias se considera de mayo a noviembre. Estas lluvias de verano están principalmente asociadas a los siguientes sistemas: zona de convergencia intertropical, ciclones tropicales, ondas del este, y monzón de Norteamérica. Es importante notar que México se ve afectado por ciclones tropicales por ambas costas: la del Océano Atlántico y la del Océano Pacífico. En esta última se presenta la mayor actividad ciclogénica por unidad de área en el mundo.

Para estudiar la precipitación registrada sobre la república mexicana, es necesario recurrir a la información del Servicio Meteorológico Nacional mediante la Red de Datos de Estaciones Climatológicas para México (CLICOM), a través del sistema de consulta Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC).

El ERIC facilita la extracción de la información del banco de datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional contenida en la base de datos CLICOM, tal como se encontraba en marzo del 2009, de acuerdo a la versión utilizada para este documento (ERIC III 2.0, 2009). El sistema ERIC, herramienta que se adapta a múltiples necesidades del usuario, contiene datos digitalizados de estaciones climatológicas de variables como precipitación, temperatura, temperatura máxima, temperatura mínima, evaporación, cobertura del cielo, tormentas eléctricas, granizo, niebla, etcétera. La base de datos está organizada para consultar las variables meteorológicas seleccionadas en un período determinado y dentro de una región o de todo el país, a fin de facilitar el uso de información climatológica para el entendimiento del clima en México.

El sistema ERIC puede obtener información de variables climatológicas a manera de promedios, acumulados, máximos y mínimos para las regiones de interés. Con esta herramienta se calculó el promedio correspondiente al período 1979-2003, descargando individualmente los datos de precipitación acumulada de cada mes y realizándose un promedio para el período mayo-noviembre. Como producto final se obtuvo una matriz de valores correspondientes a los datos de precipitación acumulada para el período de mayo a noviembre, promediado de 1979 a 2003, y a partir de estos resultados se elaboró el mapa 3.2.

En el mapa 3.2 es posible notar que los eventos de mayor precipitación acumulada ocurren principalmente en Veracruz, Tabasco y Chiapas, a lo largo de la Sierra Madre Oriental. También es posible observar que en el altiplano la magnitud de la precipitación es menor, mientras que los valores más bajos se presentan en la península de Baja California. Los máximos de precipitación están parcialmente asociados a la actividad ciclónica, fenómenos que producen precipitaciones extremas en periodos cortos, sobre todo en zonas serranas cercanas a los océanos Atlántico y Pacífico.

## Riesgo actual de las entidades federativas de la república mexicana ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales

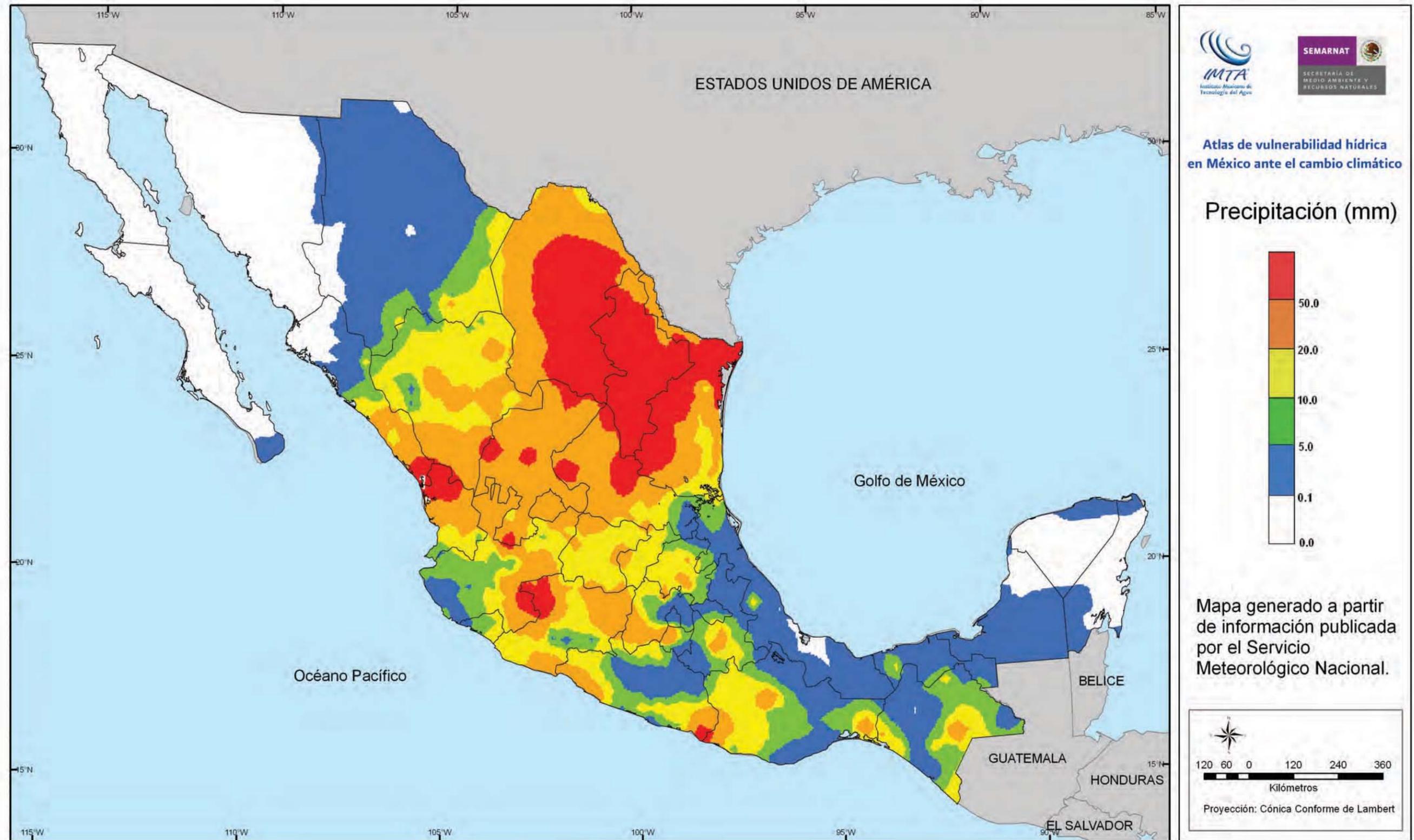
Para calcular el peligro y la vulnerabilidad actual por entidad federativa en México, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

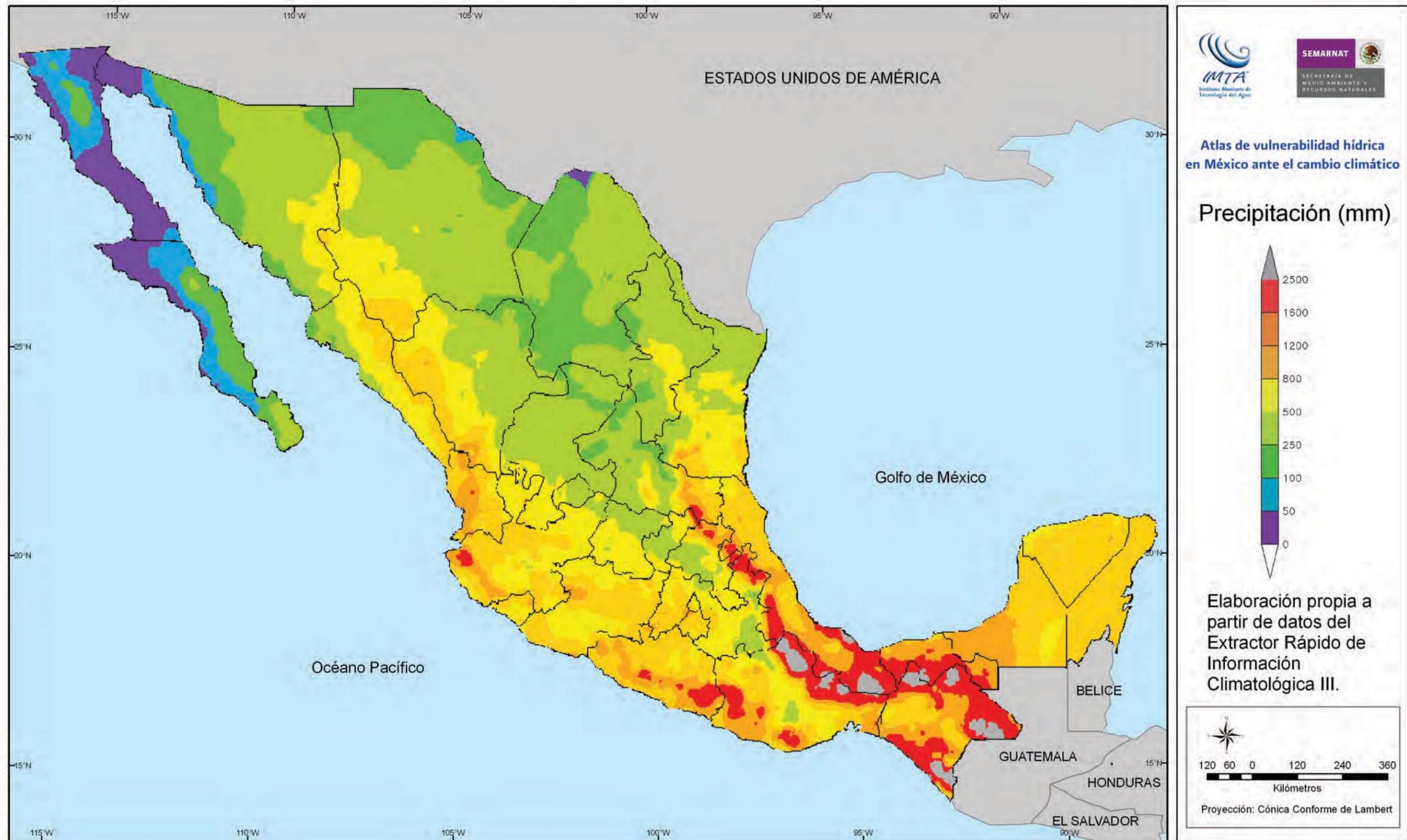
Se designaron cinco categorías: dos para el peligro y tres para la vulnerabilidad documentadas en un cuadro para cada una de ellas. En estos cuadros se ordenaron las 32 entidades federativas: al inicio de cada cuadro se encuentran aquellas cuya categoría contribuye en mayor medida al peligro o a la vulnerabilidad. Posteriormente se definieron índices numéricos para las entidades federativas, estableciéndose un índice con valor de 8 para cada uno de los primeros cuatro lugares de cada categoría, un índice de 7 para los lugares que van del 5 al 8, de 6 para los lugares 9, 10, 11 y 12 y así sucesivamente hasta el valor del índice 1 para los lugares 29, 30, 31 y 32.

El origen de los valores resultantes de los índices es estrictamente cuantitativo, sin embargo el resultado se debe considerar de modo cualitativo al radicar su utilidad en la determinación del valor relativo del riesgo de cada una de las entidades federativas.

Para evaluar el índice de peligro se calculó un promedio del índice de precipitación durante la temporada ciclónica (acumulado de mayo a noviembre y promediado en el período 1941-2005) y el índice de impacto de ciclones tropicales entre los años 1970 y 2008, para cada entidad federativa (cuadro 3.2). Ambas bases de datos han sido publicadas en el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional (<http://smn.cna.gob.mx/>):

- La precipitación acumulada de mayo a noviembre sobre la república mexicana, representa los fenómenos asociados principalmente a la entrada de humedad de los océanos Atlántico y Pacífico a través de sistemas tropicales como la zona de convergencia intertropical, las ondas del este y los ciclones tropicales. De acuerdo a las técnicas actuales de análisis, resulta complicado asignar el origen de una lluvia determinada a un fenómeno particular, ya que éstos coexisten en fronteras espaciales y temporales que no se pueden definir, debido a la evolución constante de las condiciones atmosféricas y al carácter de fluido que tienen las masas de aire.





- El Servicio Meteorológico Nacional ha publicado el nombre de las entidades federativas afectadas durante el ingreso o paso de ciclones tropicales, determinando el nombre y la intensidad del ciclón durante el impacto inicial, el lugar de entrada a tierra, el período de afectación y el océano de origen del fenómeno. Esta información ha servido para cuantificar la categoría de impacto de cada entidad federativa.

**Cuadro 3.2. Índices de precipitación e impacto de ciclones tropicales y su contribución al peligro.**

Índice	Fuente de la información	Contribución al Peligro
Precipitación durante la temporada ciclónica	Página web del Servicio Meteorológico Nacional	50%
Impacto de ciclones 1970-2008	Página web del Servicio Meteorológico Nacional	50%

Para estimar la vulnerabilidad de cada entidad federativa se consideraron las categorías de densidad de población (con una contribución del 50%), la marginación (25% de contribución) y el producto interno bruto per cápita (25% de contribución):

- La densidad de población permite identificar el grado de exposición a la que se enfrentarán los habitantes de las zonas posiblemente afectadas por la temporada de lluvias y ciclones tropicales.
- El índice absoluto de marginación permite diferenciar a las entidades federativas de acuerdo con el nivel global de las carencias que padece la población como resultado de la falta de acceso a la educación primaria, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios reducidos y las derivadas de la residencia en localidades pequeñas, aisladas y dispersas, como puede ser la falta de servicios de salud, equipamientos e infraestructura adecuada, lo cual conforma una precaria estructura de oportunidades que obstruyen el pleno desarrollo de las potencialidades humanas.
- El producto interno bruto (PIB) per cápita es muy utilizado como medida de bienestar de la población ya que ha permitido comparar el bienestar entre países, dado que representa, teóricamente, el valor de los bienes y servicios producidos en promedio por cada habitante de un país. En nuestro caso, el PIB per cápita se considera una medida de la resiliencia de la población ante la posible afectación por lluvias y ciclones tropicales; pues mientras mayor sea el PIB per cápita, mayor será la capacidad de los habitantes de sobreponerse a los efectos destructivos de los fenómenos meteorológicos.

El cuadro 3.3 muestra la contribución relativa de las categorías de densidad de población, marginación y PIB per cápita.

**Cuadro 3.3. Categorías de densidad de población, marginación y el PIB per cápita.**

Categoría	Fuente de la información	Contribución a la Vulnerabilidad
Densidad de población	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática	50%
Índice de marginación	Consejo Nacional de Población	25%
PIB per cápita	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática	25%

El cuadro 3.4 muestra los índices de vulnerabilidad y peligro calculados según el procedimiento descrito para cada entidad federativa, ordenados de manera descendente. La mayor vulnerabilidad o peligro está indicado por un índice más alto.

El riesgo fue calculado a partir de los índices de peligro y vulnerabilidad de la siguiente manera:

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

El operador raíz cuadrada se aplicó para obtener un rango de los valores del riesgo del 1 al 8, que es el rango de valores del peligro y la vulnerabilidad. El valor numérico del riesgo de cada entidad federativa se muestra en el cuadro 3.5.

El mapa 3.3 muestra el riesgo actual de las entidades federativas de la república mexicana ante la temporada de lluvias (mayo a noviembre) y el ingreso de ciclones tropicales. Las entidades con muy alto riesgo ante la temporada de lluvias y el ingreso de ciclones tropicales son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Mientras Veracruz es afectado por ciclones que tienen su origen en el Océano Atlántico, Guerrero y Michoacán por ciclones del Océano Pacífico, y Chiapas es alterado por ciclones de ambos océanos. En situación de alto riesgo se encuentran estados que colindan con el Océano Pacífico, como Oaxaca, Colima, Jalisco y Sinaloa; estados vecinos al Golfo de México como Yucatán y Tabasco; y estados del interior como Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí. La entidad que presenta menor riesgo ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales es Chihuahua.

**Cuadro 3.4. Índices de vulnerabilidad y peligro para cada entidad federativa. La mayor vulnerabilidad o peligro está indicada por un índice más alto.**

Entidad	Índice de Vulnerabilidad	Entidad	Índice de Peligro
Tlaxcala	7.25	Veracruz	7.5
Puebla	6.75	Chiapas	7
Chiapas	6.5	Quintana Roo	7
Guerrero	6.5	Colima	6.5
Hidalgo	6.5	Guerrero	6.5
Veracruz	6.5	Michoacán	6.5
Estado de México	6.25	Campeche	6
Guanajuato	6	Jalisco	6
Morelos	6	Oaxaca	6
Michoacán	5.75	Sinaloa	6
Oaxaca	5.5	Yucatán	6
Querétaro	5.25	Nayarit	5.5
San Luis Potosí	5	Tabasco	5.5
Aguascalientes	4.75	Tamaulipas	5.5
Colima	4.75	Puebla	5
Tabasco	4.75	San Luis Potosí	5
Yucatán	4.75	Baja California Sur	4.5
Distrito Federal	4.5	Hidalgo	4
Jalisco	4.5	Estado de México	3.5
Nayarit	4.5	Morelos	3.5
Sinaloa	4.5	Nuevo León	3.5
Zacatecas	4.25	Sonora	3.5
Nuevo León	3	Coahuila	3
Tamaulipas	3	Distrito Federal	3
Baja California Norte	2.75	Durango	3
Campeche	2.75	Chihuahua	2.5
Durango	2.5	Querétaro	2.5
Quintana Roo	2.5	Aguascalientes	2
Sonora	2	Baja California Norte	2
Coahuila	1.75	Guanajuato	2
Baja California Sur	1.5	Tlaxcala	2
Chihuahua	1.25	Zacatecas	2

**Cuadro 3.5. Índices de riesgo en cada entidad federativa ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales.**

Entidad	Índice de Riesgo
Veracruz	6.98
Chiapas	6.75
Guerrero	6.50
Michoacán	6.11
Puebla	5.81
Oaxaca	5.74
Colima	5.56
Yucatán	5.34
Jalisco	5.20
Sinaloa	5.20
Tabasco	5.11
Hidalgo	5.10
SLP	5.00
Nayarit	4.97
Estado de México	4.68
Morelos	4.58
Querétaro	4.39
Campeche	4.06
Tamaulipas	4.06
Tlaxcala	3.81
Distrito Federal	3.67
Quintana Roo	3.54
Guanajuato	3.46
Nuevo León	3.24
Aguascalientes	3.08
Zacatecas	2.92
Durango	2.74
Sonora	2.65
BCS	2.60
BCN	2.35
Coahuila	2.29
Chihuahua	1.77

## Simulaciones de lluvia y ciclones tropicales

El cambio climático tiene una influencia directa en los índices que cuantifican el peligro ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales. Debido a la escala espacial y temporal en la que ocurren los ciclones tropicales, se escogió al modelo de clima japonés de alta resolución en sus simulaciones del escenario A1B, como

el más adecuado para estudiar las modificaciones que estos fenómenos pueden tener ante el cambio climático.

## El modelo japonés de alta resolución

El modelo de clima japonés de alta resolución fue creado por el Instituto de Investigaciones Meteorológicas de la Agencia Meteorológica Japonesa (Oouchi *et al.*, 2006), tiene una resolución horizontal que se conoce técnicamente como TL959, equivalente a unos 20 km. Calcula las variables meteorológicas en sesenta niveles verticales. Su origen fue un modelo de predicción numérica del tiempo atmosférico adaptado para simulaciones climáticas (Mizuta *et al.* 2006).

El modelo climático se ejecuta en la computadora conocida como *Simulador Terrestre*, fabricada por NEC. Este equipo tiene una considerable capacidad de memoria y de velocidad de procesamiento de datos, siendo en la actualidad uno de los más poderosos en el mundo. La computadora se encuentra instalada en el Instituto JAMSTEC Yokohama, y opera desde marzo de 2002 para el estudio de las ciencias terrestres.

La gran ventaja de trabajar con un modelo de alta resolución radica en su capacidad de reproducción de la dinámica de los ciclones tropicales como un conjunto de sistemas convectivos de escala media y como una perturbación de escala sinóptica. Los ciclones simulados por este modelo son el resultado de una formación espontánea (sin forzamientos artificiales) dentro del sistema climático. Dentro de un escenario climático más cálido, debido a los gases de efecto invernadero, el uso de una malla de 20 km provee información más confiable asociada a la formación, evolución y disipación de ciclones tropicales que modelos de escala más burda.

La base de datos del modelo japonés presenta resultados para tres periodos: *actual* (1979-2003), *futuro cercano* (2015-2039) y  *finales del siglo* (2075-2099). La información en cada período consta de variables climatológicas (temperatura, precipitación y viento) con una resolución temporal de seis horas. Se realizó el promedio de la lluvia acumulada para la temporada de lluvias y ciclones tropicales para el período *actual* (1979-2003), identificando los valores más elevados de precipitación acumulada sobre los ejes montañosos occidental y oriental de México, así como sobre la región central del país.

Para corroborar la calidad de la modelación resultante, se pueden analizar simultáneamente los resultados del modelo japonés para la precipitación

acumulada de mayo a noviembre promediada entre 1979 a 2003 (mapa 3.4) y la misma información correspondiente a la precipitación histórica (mapa 3.2). Como resultado, se observa que el modelo es capaz de reproducir la variabilidad espacial observada, esto es, máximos a lo largo de las costas del Océano Pacífico y del Golfo de México, valores relativamente menores en el altiplano, y los valores mínimos en la península de Baja California; sin embargo, el modelo japonés tiende a intensificar los valores de la lluvia sobre la Sierra Madre Occidental, eje volcánico central de México y sureste del país, mientras que en la Sierra Madre Oriental, la precipitación histórica observada es mayor.

## Simulación de ciclones tropicales ante el cambio climático

La mayor parte de los modelos climáticos que han estudiado la influencia que tiene el calentamiento global sobre la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales, son de una resolución relativamente alta (de alrededor de 100 km). Estos modelos sugieren una tendencia hacia una menor frecuencia en la ocurrencia de ciclones tropicales (Sugi *et al.*, 2002). Sin embargo, la resolución de estos modelos aún es insuficiente para representar la estructura de los ciclones tropicales reales. Por ello, los modelos climáticos de más alta resolución tienen ventajas sobre modelos con menor detalle espacial. La principal desventaja es que aún es muy limitado el número de simulaciones climáticas con resoluciones comparables a las obtenidas con el modelo japonés (de alrededor de 20 km en dirección horizontal).

A manera de ejemplo, a continuación se describe la evolución de uno de los ciclones tropicales generados por el modelo japonés en el escenario A1B, del 12 al 21 de septiembre de 2095:

El ciclón se genera a partir de una onda del este que cruza el arco de las Antillas menores el 12 de septiembre. Dicha onda genera una circulación ciclónica el 14 de septiembre al sur de la República Dominicana. Para el día 16 de septiembre (mapa 3.5), el ciclón se intensifica sobre aguas del mar Caribe, continuando con un movimiento hacia el oeste. Una medida de la intensificación del ciclón es el grado de concentración de los contornos de presión reducida a nivel del mar, mientras mayor sea su concentración, mayor es la velocidad del viento del fenómeno. Para el día 17 ingresan las primeras bandas de lluvia a Quintana Roo y Yucatán. La mayor parte del ciclón se encuentra, para el 18 de septiembre, sobre la península de Yucatán, dejando precipitaciones acumuladas de tipo torrencial (superiores a los 150 mm) en 24 horas. Para el 19 de septiembre el ciclón se intensifica de manera considerable sobre las aguas de la Sonda de

Campeche mientras se forman grandes bandas que cruzan el Golfo de México y el istmo de Tehuantepec. El 20 de septiembre, el ciclón se intensifica de modo considerable y sus bandas externas tocan la costa norte de Veracruz. El 21 de septiembre el ciclón ha ingresado por segunda ocasión a la república mexicana, dejando lluvias torrenciales sobre Hidalgo y el norte de Veracruz. Posteriormente el 22 de septiembre, los remanentes del fenómeno se han movido a la frontera entre Texas y Tamaulipas, pasando a formar parte de un sistema frontal, mientras que al mismo tiempo dejan lluvias entre moderadas a fuertes sobre la mayor parte del país.

Las simulaciones de este huracán en particular sugieren que el modelo es capaz de capturar los campos de precipitación y presión atmosférica con una resolución adecuada para el análisis del impacto de estos eventos.

## Peligro ante futuras temporadas de lluvias y ciclones tropicales

Para tener una estimación de los peligros futuros ante lluvias y ciclones tropicales en el escenario de cambio climático A1B, con la ayuda de las simulaciones del modelo japonés de clima de alta resolución, se calcularon las anomalías de precipitación sobre la república mexicana durante la temporada de lluvias y ciclones tropicales, para los periodos 2015-2039 y 2075-2099 con respecto al período de referencia (1979-2003). El procedimiento consiste en estimar el valor promedio y su desviación con respecto a lo que el mismo modelo simula en el período 1979-2003, para lo cual se calculan las anomalías, que son una estimación de los cambios que se esperan en el futuro.

En el mapa 3.6 se muestra la anomalía de precipitación del período 2015-2039, observándose anomalías mayormente positivas para las zonas costeras de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, así como para el centro de Michoacán, el norte de la Sierra Madre Occidental y el istmo de Tehuantepec. Las anomalías negativas más significativas se encuentran sobre Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y el sur de Puebla. La zona noreste de la república, la península de Yucatán, el norte de Chiapas y sur de Tabasco también presentan anomalías negativas.

La anomalía de precipitación para el período 2075-2099 se muestra en el mapa 3.7, donde los patrones son similares al período 2015-3039 (mapa 3.6), sin embargo la magnitud se ha incrementado considerablemente. Anomalías positivas superiores a los 150 mm se encuentran sobre buena parte de la Sierra Madre del Sur y sobre el norte de la Sierra Madre Occidental. Anomalías menores a -150 mm se observan sobre amplias regiones de Jalisco, la península de Yucatán, el norte de Chiapas, Morelos, sur de Puebla y norte de Guerrero. Por

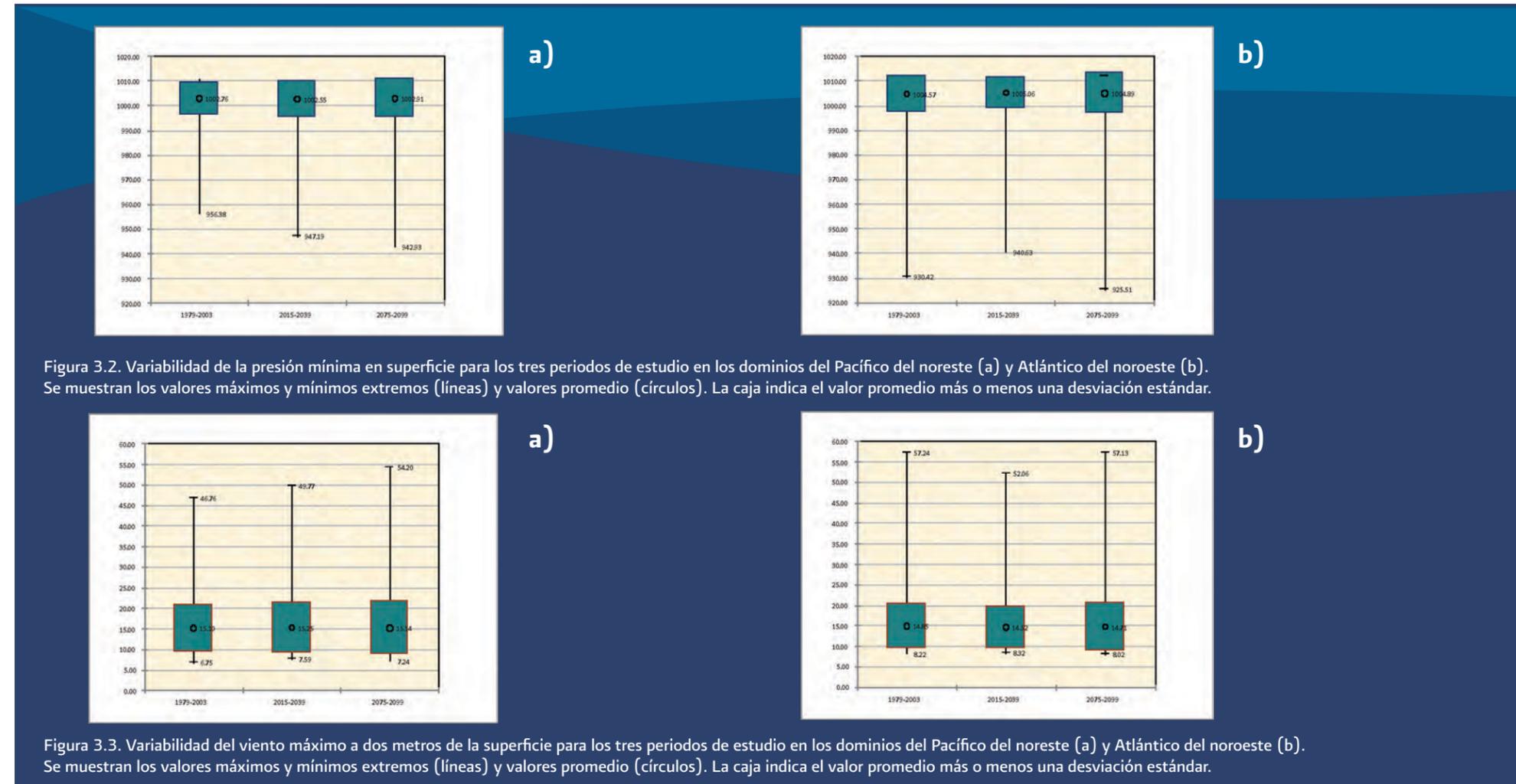
otra parte, la anomalía de precipitación sobre la región fronteriza del noreste ha pasado de negativa a positiva.

Para realizar el análisis de los posibles cambios futuros en la actividad ciclónica se utilizan dos indicadores de magnitud de los ciclones tropicales: presión atmosférica y viento máximo en superficie, ambos del modelo japonés.

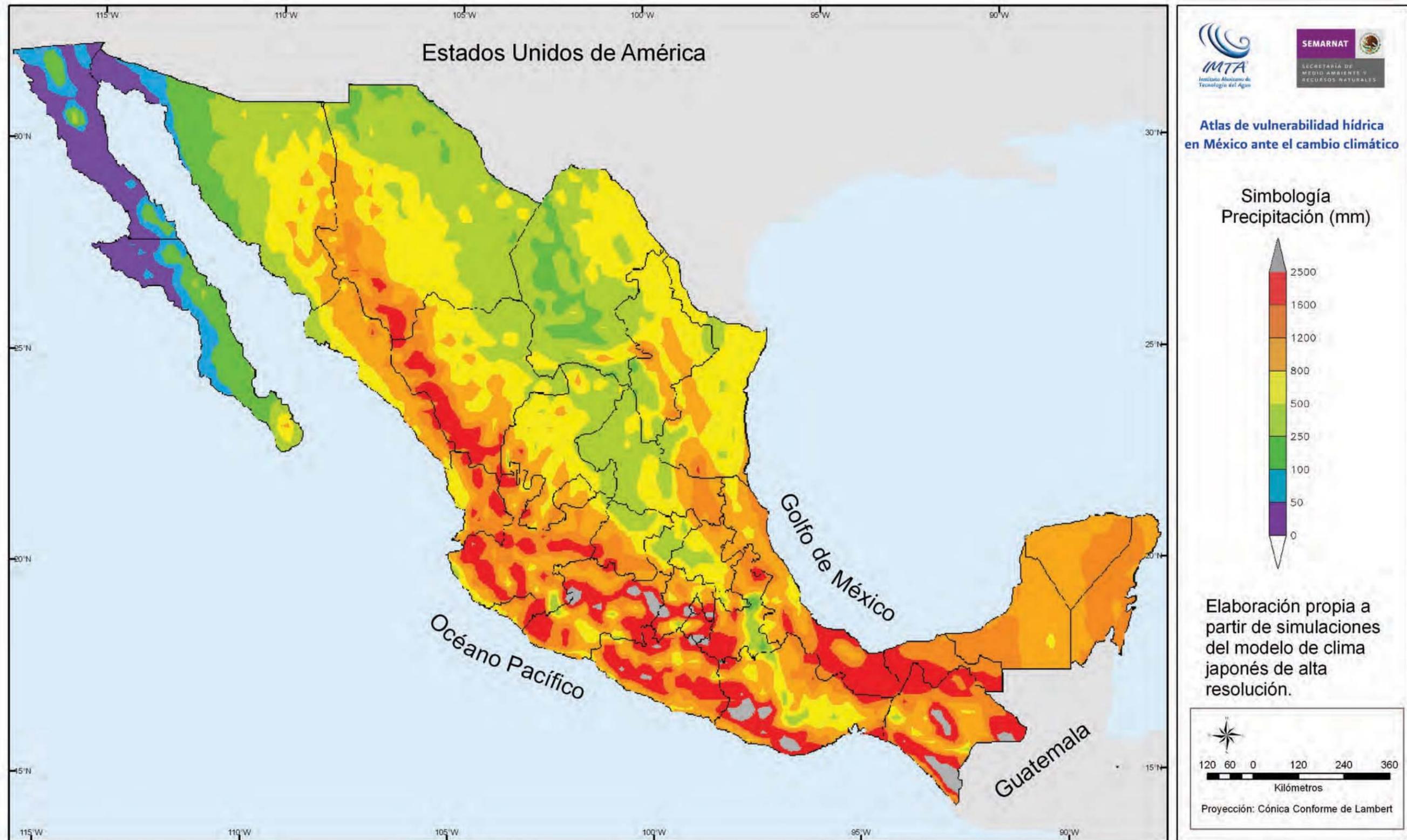
Los ciclones tropicales están asociados a centros de baja presión atmosférica a nivel del mar, alrededor de los cuales giran vientos que pueden llegar a tener más de 100 km/h de intensidad. Para determinar la variabilidad de la presión mínima a nivel del mar y del viento máximo en superficie que se asocia directamente a la actividad de ciclones tropicales, se escogieron dos regiones: el Océano Pacífico del noreste y el Atlántico del noroeste. Las coordenadas geográficas de la región Pacífico del noreste van desde 5° a 18° de latitud norte y desde 90° hasta 125° de longitud oeste; las coordenadas de la región del Atlántico noroeste van desde

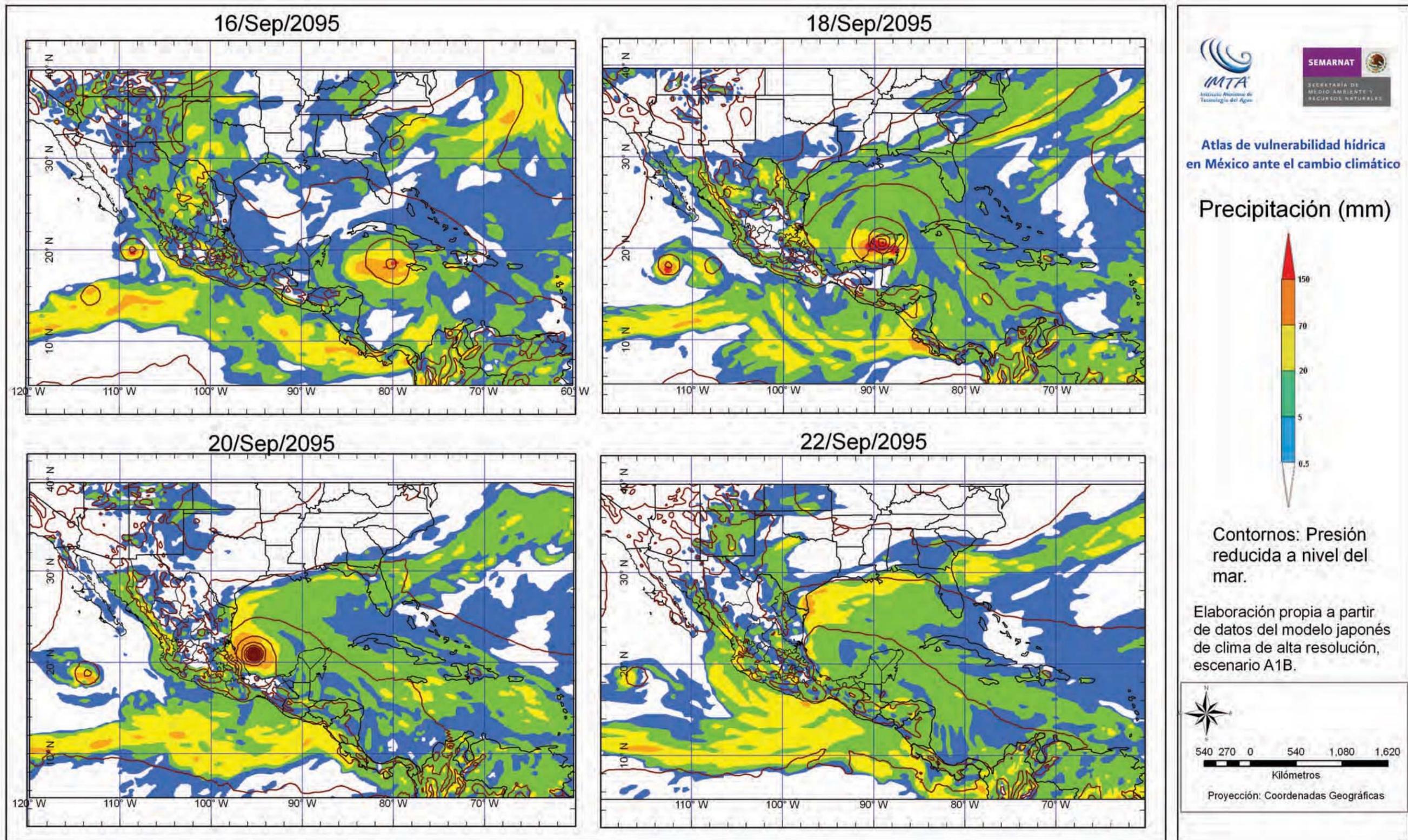
15° a 30° de latitud norte y de 60° a 100° de longitud oeste (mapa 3.8). Las figuras 3.2 y 3.3 muestran diagramas de caja que representan la variabilidad del valor mínimo de presión atmosférica y del valor máximo del viento en superficie, respectivamente. Para ambas regiones oceánicas y para los periodos 1979-2003, 2015-2039 y 2075-2099 se indican los valores máximos, mínimos y promedios de cada período, el tamaño de la caja indica el valor promedio más o menos una desviación estándar.

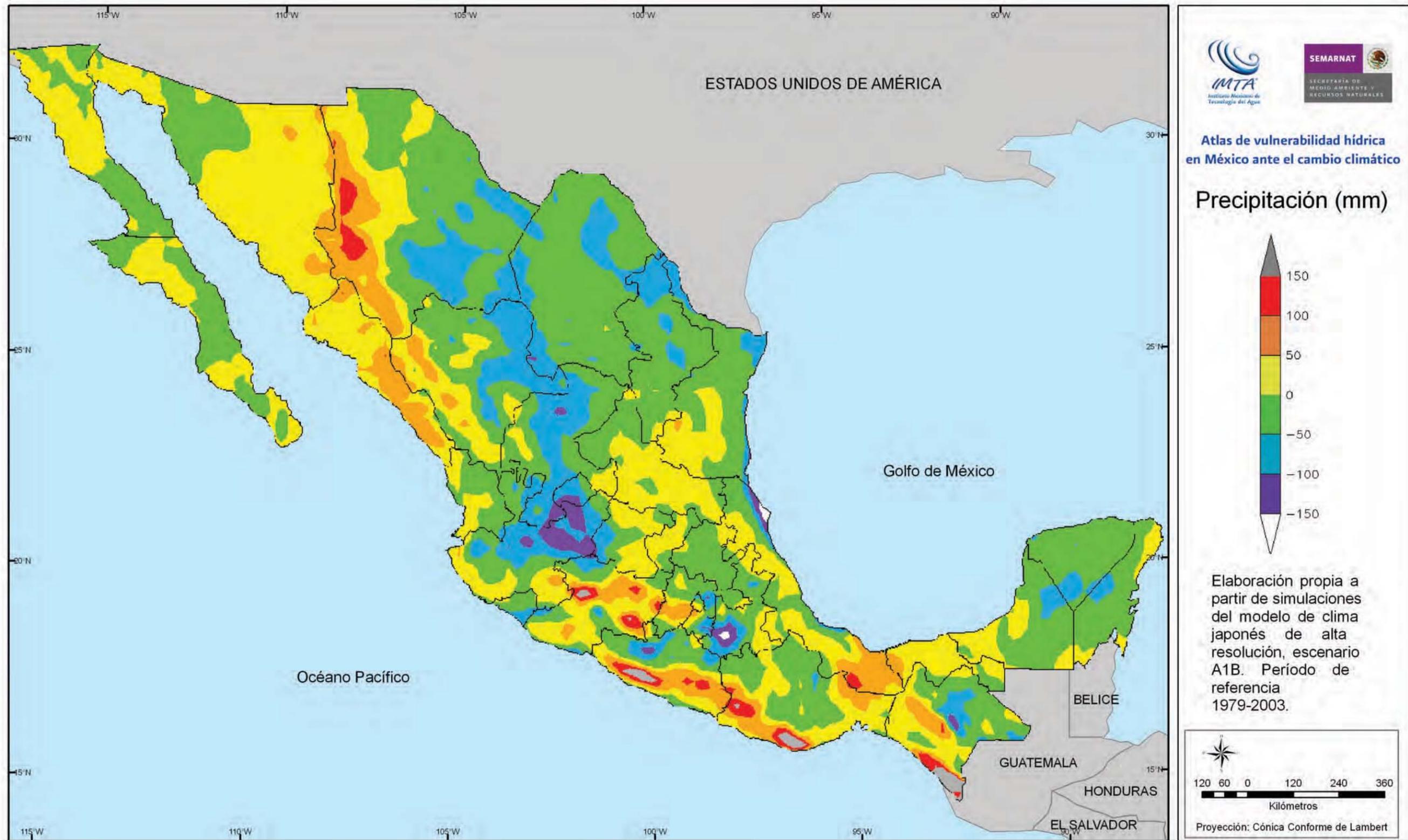
La variabilidad de la presión mínima en superficie sobre el Océano Pacífico del noreste está indicada en la figura 3.2a, la cual presenta una tendencia de disminución en los mínimos extremos, mientras que la figura 3.3a muestra una intensificación de los eventos extremos de viento, sugiriendo un incremento en la magnitud de los huracanes más intensos. Por otra parte se observa que en el Océano Atlántico del noroeste las intensidades se mantienen dentro de los rangos del período de referencia (figuras 3.2b y 3.3b).

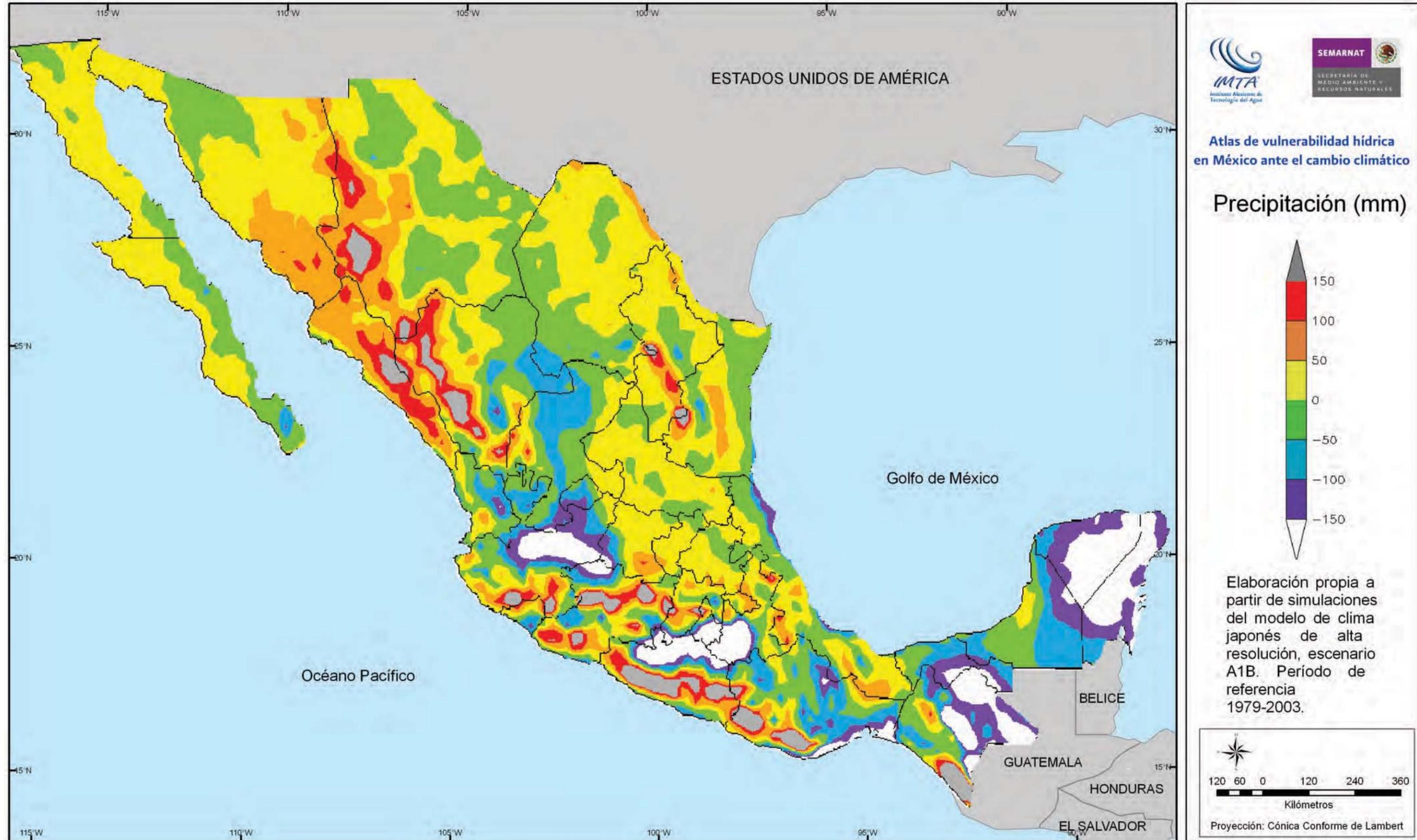








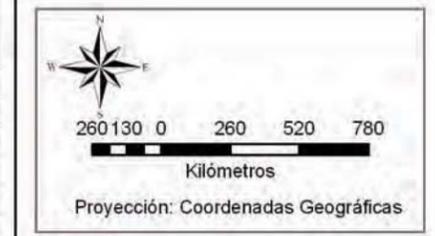






Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Dominios escogidos para el análisis de variables meteorológicas simuladas por el modelo japonés, en el Océano Pacífico del noreste (línea roja) y en el Océano Atlántico del noroeste (línea azul).



## Medidas de prevención y mitigación

Existen diversas medidas que se pueden tomar antes de la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Se debe contar con mapas de riesgo suficientemente detallados que permitan dirigir los recursos necesarios para una mejor preparación, como es la educación, identificación de rutas de evacuación, etcétera. El análisis de riesgos también permite decidir sobre el tipo de esquema financiero que es conveniente para enfrentar posibles eventos como puede ser aseguramiento de bienes y estructuras.

Ante un escenario de aumento en la magnitud de huracanes más intensos en el Océano Pacífico se sugiere implementar medidas de prevención y mitigación como las siguientes: operar sistemas de pronóstico estacional del clima, sistemas de pronóstico meteorológico de mediano y corto plazo, actualización y continuidad de atlas de riesgos hidrometeorológicos, implementar sistemas de alerta temprana, esquemas financieros de administración de riesgo, planes de respuesta, así como realizar una adecuada planeación del uso del suelo para el establecimiento futuro de asentamientos humanos, zonas agrícolas, áreas recreativas y centros de desarrollo industrial.

## Conclusiones

En este trabajo se ha estimado de forma cuantitativa que los estados de la república mexicana con muy alto riesgo ante la temporada de lluvias y el ingreso de ciclones tropicales son Veracruz, Chiapas, Guerrero y Michoacán. Veracruz es afectado por ciclones que tienen su origen en el Océano Atlántico, mientras que Guerrero y Michoacán por ciclones del Océano Pacífico, y Chiapas es afectado por ciclones de ambos océanos. En situación de alto riesgo se encuentran estados que colindan con el Océano Pacífico, como son Oaxaca, Colima, Jalisco y

Sinaloa; estados vecinos al Golfo de México como Yucatán y Tabasco; y estados del interior como Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí. El estado de menor riesgo ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales es Chihuahua.

A través de las simulaciones del modelo japonés de clima de alta resolución se estima que el cambio climático ocasionará modificaciones considerables a los regímenes de precipitación sobre el país, así como a la intensidad y variabilidad con que se presentan los ciclones tropicales en los océanos que rodean a México. Por estos motivos, se hace necesario el comenzar a tomar medidas de adaptación que permitan afrontar de manera adecuada, las amenazas de fenómenos extremos de precipitación. La mayor parte de las medidas que se pueden tomar para este fin, consisten en reducir la vulnerabilidad de la población ante tales eventos, valiéndonos de una mayor y mejor preparación incluyendo la construcción de infraestructura hidráulica de protección.

El análisis de riesgos debe ser un proceso dinámico el cual actualice los índices de acuerdo a la información más reciente. Asimismo, el riesgo debe ser calculado de manera consistente a largo, mediano y corto plazos, e inclusive en tiempo real para situaciones con necesidad de atención inmediata.

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

1. Hacer la evaluación a escala municipal.
2. Incorporar nuevas componentes para el cálculo de la vulnerabilidad y el peligro, algunas de las que pueden ser de mayor importancia son los aspectos hidrológicos, por ejemplo, definiendo la parte de la población que se encuentra asentada en zonas inundables; la estimación de zonas de alta exposición a vientos extremos; la determinación de las regiones que sean susceptibles de deslaves o desgajamientos aún cuando sean zonas relativamente libres de inundación.
3. 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.

## Referencias

- Hubp J. H., Moshe I., Desastres Naturales en América Latina. Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 2002.
- IMTA, Extractor Rápido de Información Climatológica III 2.O. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2009.
- IPCC. 2007. Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat. Geneva, Switzerland. <http://www.ipcc.ch/>
- MIZUTA, R., OOUCHI, K., YOSHIMURA, H., NODA, A., KATAYAMA, K., YUKIMOTO, S., HOSAKA M., KUSUNOKI, S., KAWAI, H., AND NAKAGAWA, M., 20-Km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model, J. Meteor. Soc. Japan, 84, 165-185, 2006.
- OOUCHI, K., YOSHIMURA, H., YOSHIMURA, J., MIZUTA, R., KUSUNOKI, S., AND NODA, A., Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses. Journal of the Meteorological Society of Japan. 84, 2, 259-276, 2006.
- SUGI, M., NODA, A., & SATO, N., Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. J. Meteor. Soc. Japan, 80, 249-272, 2002.
- YUSUF, A. A., & FRANCISCO, H., Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia, EEPSEA Special and Technical Paper tp200901s1, Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA), 2009.

## Agradecimientos

Al Dr. Edgar Misael Uribe Alcántara, por sus valiosos comentarios sobre la elaboración de este trabajo. Al M. en C. Alberto Balancán Soberanis, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su participación en el trabajo de coordinación del documento. Al Instituto de Investigaciones Meteorológicas de Japón por la información de su modelo de alta resolución.



## **Capítulo 4. Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales**

*Iván Rivas Acosta, Alberto Güitrón de los Reyes  
y Héctor Alonso Ballinas González*





### Resumen

Este capítulo tiene como objetivo la evaluación del impacto del cambio climático (CC) en los escurrimientos superficiales en tres de las principales cuencas nacionales, al norte de México la cuenca del río Conchos, al centro la cuenca Lerma-Chapala y al sur la cuenca del río Grijalva. Dicha evaluación consistió en la estimación del escurrimiento superficial considerando la variación en la precipitación futura a causa del CC. A partir del cambio en los escurrimientos se consideró la definición de vulnerabilidad ante el CC definida por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en Inglés) para identificar las regiones más vulnerables. El producto final se presenta en forma de mapas de vulnerabilidad que identifican las zonas más sensibles ante los efectos del CC con énfasis especial en los cambios del escurrimiento superficial. Los resultados muestran un decremento en escurrimientos vírgenes anuales en las tres cuencas bajo estudio.

### Introducción

#### Marco conceptual

El gobierno de México reconoce que el cambio climático constituye el principal desafío ambiental global de este siglo y que representa, a mediano y largo plazos, una de las mayores amenazas para el proceso de desarrollo y el bienestar humanos. Además de producir un desplazamiento de regiones climáticas, intensificación de sequías, inundaciones, huracanes intensos, derretimiento de glaciares, aumento en el nivel del mar, entre otros efectos, incide en la pérdida de biodiversidad así como en el deterioro de los recursos hídricos y de los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas (SEMARNAT, 2009).

Las decisiones acerca de la gestión de los recursos hídricos dependen de las condiciones climáticas y de un adecuado manejo de las fuentes de suministro, especialmente los embalses. En el pasado, estas decisiones asumían que las condiciones climáticas futuras tendrían las mismas características y variabilidad que las condiciones del pasado sin considerar los cambios climáticos que pudieran presentarse. Por tanto, el reto es incorporar la incertidumbre del cambio climático en la administración del agua; particularmente, es de relevancia estimar el impacto del cambio climático en los cambios del régimen de escurrimiento de los ríos y la vulnerabilidad que ello implica en los sistemas hidrológicos y de uso del agua.

El presente estudio es fundamental para dar cumplimiento a lo establecido en el Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012 (PECC) emprendido por la

SEMARNAT (2009), dado que en el objetivo 3.2.5 se recomienda profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad de los recursos hídricos ante la variabilidad y el cambio climático.

El proceso de cambio climático tiene un impacto global de largo plazo que solo puede abordarse con una visión de futuro, esencial para la planeación de las actividades humanas acorde con el desarrollo sustentable. Mediante la convergencia de objetivos de todos los países hacia una meta común de mitigación, la cooperación internacional para avanzar en materia de adaptación, la reconversión de los criterios de planeación hacia miras y objetivos que trasciendan los marcos temporales de las distintas administraciones públicas permitirán, en las próximas décadas, enfrentar con éxito este desafío (PECC, 2009).

En términos de vulnerabilidad hídrica, el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos depende de los cambios en volumen y calidad de los flujos de agua superficial y subterránea, de las descargas de agua de dichas corrientes, así como de la demanda y nivel de extracción para uso humano. Resulta de gran importancia identificar las zonas con recursos hídricos más vulnerables al cambio climático. En general, se sabe que las regiones más vulnerables son la región centro del país y la cuenca Lerma-Chapala. Las regiones más vulnerables coinciden con las más pobladas (SEMARNAT, 2010).



## Programa Especial de Cambio Climático (PECC)

El PECC (SEMARNAT, 2009) considera tres grandes etapas para afrontar los retos del cambio climático: primera etapa (2008 a 2012) consiste en la evaluación de la vulnerabilidad del país y de la valoración económica de las medidas prioritarias. La segunda etapa (2013 a 2030) establece políticas de fortalecimiento de capacidades estratégicas de adaptación, y la tercera etapa (2030 a 2050) considera la consolidación de las capacidades construidas (figura 4.1).

En México, la disponibilidad media de agua por habitante se redujo de 11,500 m<sup>3</sup> anuales en 1955, a 4,900 m<sup>3</sup> en 2000 y a 3,822 m<sup>3</sup> en 2005. Si el régimen de precipitación pluvial no se modifica sustancialmente, solo por el crecimiento de la población se esperarían disponibilidades medias de 3,610 m<sup>3</sup> en 2012, de 3,285 m<sup>3</sup> en 2030, y de 3,260 m<sup>3</sup> en 2050 (SEMARNAT, 2009). Sin embargo, es previsible que conforme avance el proceso del cambio climático, las precipitaciones sean menores pero con mayor concentración y la disponibilidad media anual de agua por habitante disminuya en forma más acelerada, especialmente en las regiones áridas y semiáridas del país. 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, aumentan los grados de vulnerabilidad futura de los recursos hídricos (SEMARNAT, 2009).

## Escenarios de cambio climático

El Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones - IEEE (*Especial Reporte on Emissions Scenarios-SRES*) es un reporte preparado por el Panel



Figura 4.1. Etapas del Programa Especial de Cambio Climático.

Intergubernamental de Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC*) en su reporte del 2001 (*Third Assessment Report-TAR*). En el IEEE se presentan escenarios futuros en cuanto a la emisión de gases invernaderos a usarse por los modelos de circulación general para el desarrollo de escenarios de cambio climático. Estos escenarios fueron usados también en el último reporte del IPCC (*Fourth Assessment Report-AR4*, 2007).

Los escenarios IEEE están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando factores demográficos, económicos y tecnológicos, junto con las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) resultantes. Los escenarios IEEE no contemplan otras políticas climáticas además de las existentes. Las proyecciones de emisión son muy utilizadas para estimar el cambio climático futuro, y sus supuestos básicos respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad del cambio climático y evaluaciones de impacto.

### i) Familia A1

La línea argumental A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).

### ii) Familia B1

B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.

### iii) Familia B2

B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento

económico intermedio más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.

### iv) Familia A2

A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.

No se han asignado niveles de probabilidad a ninguno de los escenarios IEEE, sin embargo se supone que los escenarios más probables serán el A1B y el A2, por lo cual dichos escenarios fueron considerados en el presente capítulo.

Las cuatro familias de escenarios se presentan en el cuadro 4.1 y la figura 4.2 y los intervalos probables de cambio en temperatura media global hasta el año 2100 con respecto al período 1980-1999 (IPCC, 2007).

Cuadro 4.1 IEEE-Escenarios de cambio climático.

Escenarios IEEE	Enfoque económico	Enfoque ambiental
Globalización (Mundo homogéneo)	<b>A1</b> Rápido desarrollo económico (Grupos A1T/A1B/A1FI) 1.4 - 6.4 °C	<b>B1</b> Sustentabilidad ambiental global 1.1 - 2.9 °C
Regionalización (Mundo heterogéneo)	<b>A2</b> Desarrollo económico regional 2.0 - 5.4 °C	<b>B2</b> Sustentabilidad ambiental local 1.4 - 3.8 °C

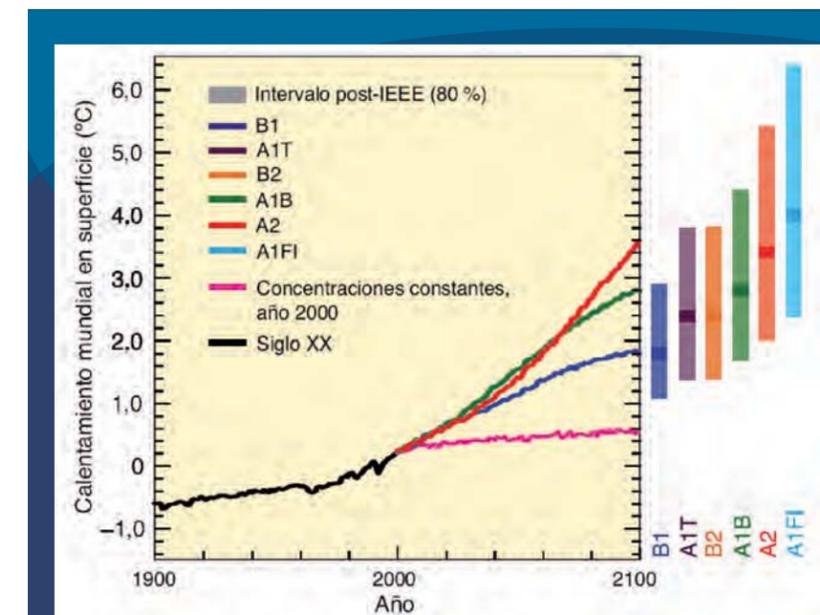


Figura 4.2 IEEE-Escenarios de cambio climático.

## Estimación de la precipitación

Los Modelos de Circulación General (MCG) son representaciones numéricas que simulan los principales procesos físicos que ocurren en la atmósfera y sus interacciones con los demás componentes del medio ambiente. Los MCG simulan ciertos parámetros climáticos a futuro, tales como la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), como resultado de diferentes escenarios del IPCC.

Un MCG consiste en una valiosa herramienta para la investigación del clima, sus resultados se presentan mediante una resolución espacial y temporal del sistema climático. Es decir mediante una malla de puntos o grid, cuyas coordenadas geográficas se encuentran uniformemente distribuidas, usualmente a una distancia de 2.5° o 1° (latitud y longitud). En cada punto, los MCG pronostican un valor de alguna variable atmosférica (usualmente precipitación y/o temperatura). Para tal efecto se utilizara el Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México (SEDEPECC) desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2009).

A partir de los datos que presenta el SEDEPECC (IMTA, 2009), se obtienen otros que incorporan distintos escenarios de cambio climático, correspondientes a varias décadas por venir en México, a partir de un conjunto de MCG. Para la obtención de cada cifra, la información de cada modelo se pondera de acuerdo con criterios de la bondad de cada modelo en la predicción de datos de clima conocidos y del comportamiento del modelo mismo dentro del método de ponderación. El SEDEPECC (IMTA, 2009) pondera 23 modelos de circulación general utilizando el método *Reliability Ensemble Averaging* (REA); los resultados obtenidos permitieron regionalizar los datos de precipitación y temperatura de superficie bajo los escenarios de cambio climático A1B y A2 hasta finales del siglo XXI en una malla regular de 0.5° x 0.5°.

Enseguida, se evaluaron dos posibles escenarios de cambio climático: A1B y A2.

Se plantean en total seis escenarios de cambio climático. La definición de los escenarios analizados se realizó en base a una combinación de las fases de planeación del PECC (SEMARNAT, 2009), considerando un horizonte de tiempo adicional a finales de siglo; y los escenarios A1B y A2 de cambio climático del IPCC (cuadro 4.2).

**Cuadro 4.2. Escenarios de cambio climático propuestos.**

Horizontes \ IPCC Escenarios	A1B	A2
Año 2009	Base	
Año 2030	A1B <sub>30</sub>	A2 <sub>30</sub>
Año 2050	A1B <sub>50</sub>	A2 <sub>50</sub>
Año 2100	A1B <sub>100</sub>	A2 <sub>100</sub>

### 1. Horizonte inicial: Base

El escenario base considera la disponibilidad hídrica actual, es decir los volúmenes de escurrimiento disponibles considerando únicamente la precipitación histórica hasta el año 2009.

### 2. Horizonte para los años 2030 y 2050: A1B<sub>30</sub>, A2<sub>30</sub>, A1B<sub>50</sub> y A2<sub>50</sub>

Estos cuatro escenarios resultan de la combinación de los horizontes de tiempo de la segunda y tercera fases del PECC (años 2030 y 2050, respectivamente)

### 3. Horizonte para el año 2100: A1B<sub>100</sub> y A2<sub>100</sub>

Dado que los escenarios A1B y A2 muestran un comportamiento relativamente similar hasta el año 2070 (figura 4.2), se incluyeron dos escenarios que consideran la precipitación hasta el año 2100.

## Impactos del cambio climático en el escurrimiento superficial

### Generalidades

Los cambios en la precipitación y en la temperatura inducen modificaciones en el escurrimiento superficial y por lo tanto, en la disponibilidad de agua (IPCC, 2007). Con un grado de confianza alto, se prevé que el escurrimiento superficial aumente entre un 10% y un 40% de aquí a mediados de siglo en latitudes superiores debido al deshielo (por ejemplo en algunas regiones de Canadá); también se estima un incremento en la frecuencia de inundaciones en ciertas áreas tropicales pluviales, como en el sureste de Asia. No obstante, también se estima que el escurrimiento disminuya entre un 10% y un 30% en ciertas regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución

de las lluvias y a unas tasas de evapotranspiración más altas, México se ubica en este último pronóstico de decremento en escurrimiento superficial anual. Sin embargo, algunos años serán atípicos y con precipitaciones intensas, como lo ha sido el 2010, al menos hasta septiembre. Es decir, los patrones históricos de precipitación en nuestro planeta difícilmente podrán repetirse.

Adicionalmente el IPCC (2007) estima con un grado de confianza alto que numerosas áreas semiáridas en el continente Americano padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático, el norte de México será especialmente vulnerable, es por ello que se incluyó la cuenca del río Conchos dentro del presente capítulo. Las áreas afectadas por sequías aumentarían en extensión y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, suministro hídrico, producción de energía o salud. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente al aumentar la evapotranspiración en los cultivos debido al aumento de la temperatura.

## Estimación del escurrimiento superficial

Para la estimación de los escurrimientos superficiales a futuro, se utilizó el método denominado indirecto dentro de la NOM-011-CNA-2000 (CNA, 2000) que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de aguas superficiales en una cuenca hidrológica. En dicha Norma, el Volumen Anual de Escurrimiento (m<sup>3</sup>) se determina como sigue:

$$V = P \cdot A \cdot C_e \quad (4.1)$$

Donde:

- V: Volumen de escurrimiento anual (m<sup>3</sup>)
- P: Precipitación anual (mm)
- A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)
- C<sub>e</sub>: Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

En la NOM-011-CNA-2000, la variable a modificar será la Precipitación Anual (P), de acuerdo con la base de datos que proporciona el SEDEPECC (IMTA, 2009). De esta manera, se obtendrán los nuevos escurrimientos impactados por el escenario de cambio climático de acuerdo a los Modelos de Circulación General (figura 4.3).

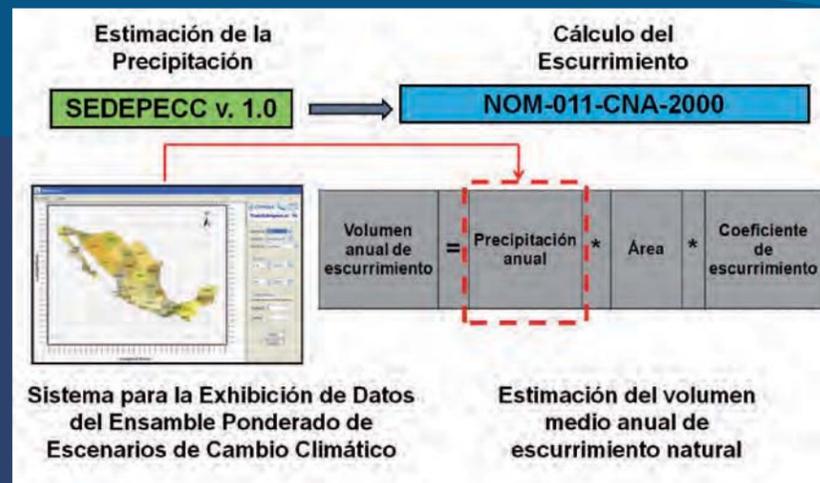


Figura 4.3 Estimación de la precipitación y cálculo del escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento depende del tipo de suelo y la cobertura vegetal (los cuales se suponen constantes en todos los escenarios de cambio climático) y de la precipitación media anual. En cuanto al tipo de suelo, se utilizó el mapa de Suelos Dominantes de la República Mexicana elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, 1998). Dicho mapa se integró mediante la generalización de las cartas edafológicas escala 1:1'000,000 del INEGI y actualizado con la versión de 1988 del sistema de clasificación FAO/UNESCO/ISRIC. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación/Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos). La información que se presenta es a nivel de unidades y subunidades de suelo. La clasificación hidrológica de los suelos realizada por INEGI divide a los suelos en cuatro grupos:

Tipo A. Suelos de gravas y arenas de tamaño medio limpias y mezclas de ambas. Estos generan el menor escurrimiento.

Tipo B. Suelos de arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de arena y limo. Generan escurrimiento inferior al medio.

Tipo C. Suelos de arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezcla de arena, limo y arcilla. Generan escurrimiento superior al medio.

Tipo D. Suelos arcillosos de alta plasticidad, con sub-horizontes casi impermeables cerca de la superficie. Generan el mayor escurrimiento.

En términos de uso del suelo, se utilizó la cobertura vegetal publicada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1998). Este mapa presenta una agrupación de las 244 clases de uso del suelo y vegetación del mapa de INEGI-INE (1996) a escala 1:1'000,000, reduciéndose a 54 clases.

Los mapas de tipo de suelos y cobertura vegetal fueron exportados como mapas rasters con una resolución espacial de 100 m. Finalmente, considerando los mapas rasters del tipo de suelo y cobertura vegetal, se obtuvo un valor ponderado del parámetro de infiltración K y el respectivo coeficiente de escurrimiento anual (CNA, 2000) en base a la precipitación anual obtenida con el SEDEPECC v. 1.0 (IMTA, 2009). Cabe mencionar que el parámetro K se supuso constante en todos los horizontes de tiempo, sin embargo el coeficiente de escurrimiento cambia en los escenarios de cambio climático, dado que está en función de la precipitación media anual. Los coeficientes de escurrimiento anual se calculan como sigue:

$$\text{Si } K \leq 0.15: C_e = \frac{K(P-250)}{2,000} \quad (4.2)$$

$$\text{Si } K > 0.15: C_e = \frac{K(P-250)}{2,000} + \frac{K-0.15}{1.50} \quad (4.3)$$

Donde:

K: Parámetro de infiltración (adimensional)

P: Precipitación media anual (mm)

### Vulnerabilidad hídrica global

Vulnerabilidad es el grado en el que un sistema es susceptible a padecer efectos adversos de cambio climático. La variabilidad está en función tres factores (IPCC, 2007): el grado de exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Estos tres factores se muestran esquemáticamente en la (figura 4.4).

A continuación se describe cada uno ellos y la manera en que se interpretaron para evaluar la vulnerabilidad hídrica global.

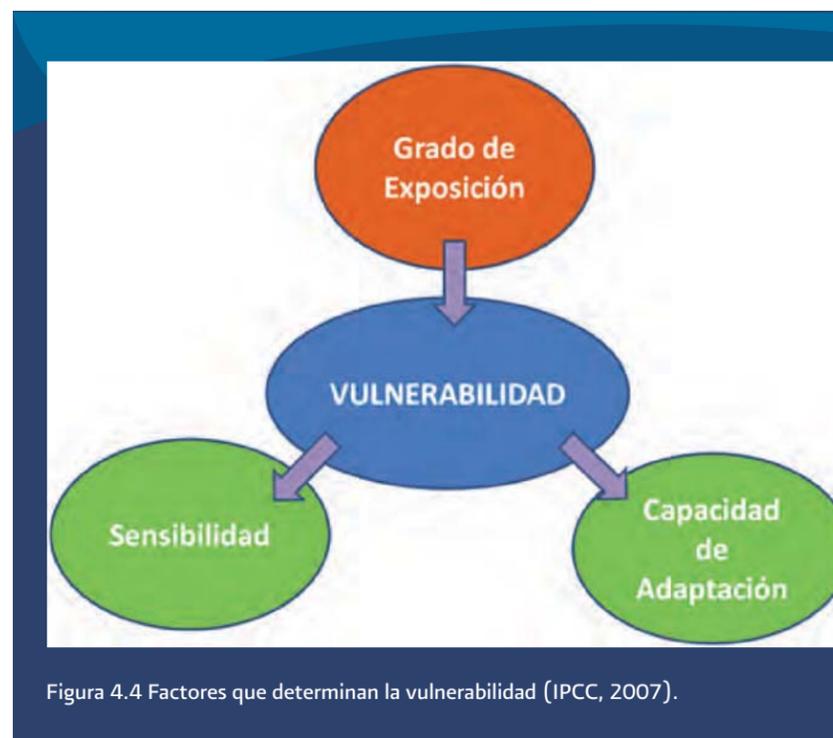


Figura 4.4 Factores que determinan la vulnerabilidad (IPCC, 2007).

### Grado de exposición

Representa la magnitud y escala de variación de clima a la cual está expuesto. En términos generales implica el grado de exposición al riesgo de sufrir huracanes, inundaciones, sequías, deslizamientos y elevaciones en el nivel del mar. En el caso de las aguas superficiales el grado de exposición se interpreta como el cambio en escurrimiento superficial que depende directamente de la precipitación.

Como paso intermedio en el cálculo del escurrimiento y con el propósito de identificar las regiones en donde el cambio en precipitación será más alto, se propone utilizar un parámetro adimensional definido como *Índice de Precipitación ante el Cambio Climático*:

$$IP_{CC} = 1 - \frac{P_{CC}}{P_H} \quad (4.4)$$

Donde:

$IP_{CC}$ : Índice de precipitación ante el cambio climático (adimensional)

$P_{CC}$ : Precipitación anual estimada (mm)

$P_H$ : Precipitación anual histórica (mm)

Un valor de 0 en el  $IP_{CC}$  representaría un cambio nulo en la precipitación, mientras que un valor de 0.10 indicaría una reducción en la precipitación del 10%. El índice propuesto se evalúa para los seis escenarios de cambio climático (cuadro 4.2.). En forma homóloga, se propone también utilizar un parámetro adimensional definido como *Índice de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático*:

$$IES_{CC} = 1 - \frac{VES_{CC}}{VES_H} \quad (4.5)$$

Donde:

$IES_{CC}$ : Índice de escurrimiento superficial ante el cambio climático (adimensional)  
 $VES_H$ : Volumen de escurrimiento superficial histórico (Mm<sup>3</sup>/año)  
 $VES_{CC}$ : Volumen de escurrimiento superficial ante el cambio climático (Mm<sup>3</sup>/año)

En donde los volúmenes de escurrimiento en la ecuación (4.5) se determinan por medio de la ecuación (4.1). Para fines prácticos, el Índice de Escurrimiento representa la fracción en la cual disminuiría el escurrimiento medio anual en relación al volumen histórico de escurrimiento. En forma similar al  $IP_{CC}$ , un valor de 0 en el  $IES_{CC}$  representaría un cambio nulo en el volumen de escurrimiento, mientras que un valor de 0.10 indicaría una reducción en el volumen de escurrimiento del 10%. Los registros históricos (hasta el 2009) permiten evaluar una condición base o inicial; la evaluación de diferentes escenarios de tiempo futuro (Horizontes 2030, 2050 y 2100) permiten evaluar las nuevas condiciones y la diferencia en ambas significa el cambio pronosticado.

## Sensibilidad

Esta componente evalúa el grado de susceptibilidad al cambio climático. Es decir, los actores que se ven afectados directamente ante un efecto adverso del cambio climático. Esta componente se interpreta como la cantidad de habitantes en los centros poblaciones, entre mayor sea el tamaño poblacional de una localidad, será más vulnerable ante el cambio climático. Para tal efecto se consideró el número de habitantes por municipio durante el censo poblacional más reciente (INEGI, 2005).

Regiones específicas presentan características peculiares de sensibilidad, en la Cuenca del Río Conchos, donde el mayor volumen de agua se destina con fines de riego, la agricultura representa una componente adicional de sensibilidad. Mientras que en la Cuenca del Río Grijalva, donde el principal uso del agua

es con fines de generación de energía hidroeléctrica, las presas hidroeléctricas representan un elemento de sensibilidad.

## Capacidad de adaptación

Se refiere al potencial de adaptarse a las alteraciones que provoca el cambio climático una vez considerados los acuíferos y el acceso de los municipios a servicios esenciales, este último cuantificado por el *Índice de Marginación Social* (CONAPO, 2005). La capacidad de adaptación en su conjunto, representa el grado de resiliencia de la cuenca ante un decremento en escurrimiento superficial debido al cambio climático.

i) Grado de explotación de los acuíferos

El agua subterránea proveniente de los acuíferos representa una importante fuente de suministro para los centros poblacionales, usos agrícolas e industriales. La CONAGUA clasificó el grado de explotación en los acuíferos nacionales bajo dos grandes categorías: sub-explotados (donde la recarga natural por precipitación es mayor a la extracción) y sobre-explotados (donde sucede lo contrario). Esta clasificación puede consultarse en el Atlas del Agua en México (SEMARNAT, 2009). Centros poblaciones y áreas de riego ubicadas sobre acuíferos sobre-explotados tendrán una vulnerabilidad mayor que aquellas localizadas sobre acuíferos sub-explotados.

ii) *Índice de marginación social*

El segundo componente que determina el grado de adaptación es el nivel de infraestructura municipal. Un grado de infraestructura municipal alto permite enfrentar de mejor manera los efectos adversos del cambio climático que un grado de infraestructura bajo, dado que el acceso a servicios municipales, tales como el del agua potable, permite tener una mayor autonomía en los efectos ambientales del cambio climático. Por otro lado, municipios con un alto índice de marginación son más vulnerables ante los efectos del cambio climático, al carecer de servicios básicos como el acceso al del agua potable y al de la electricidad.

Por ello se consideró el *Índice de Marginación Social* que observa nueve indicadores socioeconómicos (CONAPO, 2005):

1. Grado de analfabetismo
2. Educación primaria terminada
3. Drenaje sanitario

4. Acceso a energía eléctrica
5. Servicios de agua potable
6. Nivel de hacinamiento
7. Porcentaje de viviendas con piso de tierra
8. Localidades con población menor a 5,000 habitantes y
9. Ingreso económico

## Metodología de cálculo

La metodología para evaluar la vulnerabilidad se compone de varios pasos secuenciales (A,B,C y D). Tomando en cuenta la definición de vulnerabilidad del IPCC (2007), en términos generales, se identifican las variables previamente descritas, se calculan los índices respectivos, se normalizan, asignan pesos específicos y finalmente se calcula la vulnerabilidad global. Las variables consideradas (cuadro 4.3). El proceso se detalla a continuación:

**Cuadro 4.3 Variables e índices que determinan la vulnerabilidad hídrica.**

IPCC componente	Variable	Índice
Grado de exposición	Escurrimiento superficial	$IES_{CC}$
Sensibilidad	Población municipal	IPop
Capacidad de adaptación	Índice de marginación social	IMarg
	Grado de explotación en los acuíferos	IAcuifero

A. Cálculo de índices y normalización para cada variable.

*Escurrimiento superficial.* El cambio en escurrimiento superficial anual se determina directamente con la ecuación (4.5). Dado que dicho coeficiente presenta valores extremos de [0,1], no necesita normalizarse.

*Población municipal.* La población municipal de CONAPO (2005) se normaliza, para cada municipio en cada cuenca bajo estudio, utilizando la expresión siguiente:

$$Z_i = \frac{X_i - X_{i\_min}}{X_{i\_max} - X_{i\_min}} \quad (4.6)$$

Donde:

- $Z_i$  - Variable normalizada
- $X_i$  - Variable no-normalizada
- $X_{i\_min}$  - Valor mínimo de  $X_i$
- $X_{i\_max}$  - Valor máximo de  $X_i$

Índice de marginación social. Este índice publicado por el CONAPO (2005) presenta valores no-normalizados y fue necesaria su normalización mediante la ecuación (4.6).

Grado de explotación de los acuíferos. Para efectos del mapeo de la vulnerabilidad, los acuíferos tendrán valores de 0 y 1, para el caso de los acuíferos sub-explotados y sobre-explotados respectivamente.

#### B. Asignación de pesos específicos (prioridades)

Dado que cada variable mostrada en el cuadro 4.3 tiene un grado de importancia diferente, es necesario asignarle a cada una ellas un factor de peso que denote su jerarquía en relación a las demás. La asignación de pesos específicos ( $W_i$ ) o prioridades se realizó con base en un *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desarrollado por Saaty (2001) el cual es un procedimiento matemático general utilizado en la toma de decisiones que discretiza un problema en elementos de decisión. Se realiza un arreglo en donde se compara la importancia relativa entre los pares de elementos y se sintetizan los resultados mediante la asignación de pesos específicos que cumplen la siguiente condición:

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1.0 \quad (4.7)$$

Basados en la teoría matemática AHP se diseñó una encuesta en la que se realiza una comparación por pares entre los factores que afectan la vulnerabilidad (cuadro 4.3). En la encuesta participaron expertos en diferentes disciplinas relacionadas con los aprovechamientos hidráulicos (administradores, hidrólogos, ingenieros hidráulicos, sociólogos y economistas). Los resultados de la encuesta fueron promediados y utilizando un *Analytic Network Process* (ANP) implementado por Adams (2010) se obtuvieron los siguientes pesos específicos mostrados en el cuadro 4.4:

**Cuadro 4.4 Variables, índices y pesos específicos.**

IPCC componente	Variable	Índice	Peso específico	
Grado de exposición	Escorrentamiento superficial	IES <sub>CC</sub>	W <sub>s</sub>	0.71
Sensitividad	Población municipal	IPop	W <sub>p</sub>	0.13
Capacidad de adaptación	Índice de marginación social	IMarg	W <sub>M</sub>	0.09
	Grado de explotación en los acuíferos	IAcuifero	W <sub>A</sub>	0.07

#### C. Cálculo de la vulnerabilidad hídrica global.

Finalmente la vulnerabilidad hídrica global se calcula mediante la ecuación (4.8):

$$Vulnerabilidad = IES_{CC} \cdot W_s + IPop \cdot W_p + IMarg \cdot W_M + IAcuifero \cdot W_A \quad (4.8)$$

#### D. Mapeo de la vulnerabilidad hídrica global.

El paso final consiste en desplegar los resultados de manera espacial, lo anterior permite identificar las zonas más vulnerables ante los efectos adversos de cambio climático, en este caso considerando escenarios de cambio climático en el escurrimiento superficial (cuadro 4.2). Se utilizó el programa ArcGIS 9.3, un producto desarrollado por *Environmental Systems Research Institute* (ESRI).

La metodología propuesta se resume esquemáticamente en la figura 4.5. La combinación del grado de exposición y la sensibilidad se denomina impacto potencial, es decir representa el daño potencial que se presentaría sin incluir la componente de adaptación.

## Zonas geográficas bajo estudio

El impacto del cambio en los recursos hídricos, particularmente en el escurrimiento superficial depende en gran medida de la ubicación geográfica de la región. Es decir, de las condiciones ambientales actuales (niveles de precipitación, cobertura vegetal, uso de suelo, etc.); factores humanos (distribución de los centros de población, niveles de infraestructura, actividades económicas, etc.) y usos de agua (fines agrícolas, industriales, generación de energía eléctrica, etc.). Es por ello que se seleccionaron tres cuencas en el territorio mexicano en tres diferentes regiones geográficas. Sin embargo, la metodología propuesta se diseñó de tal manera que se pueda replicar en cualquier cuenca de la república mexicana y de esta forma evaluar la vulnerabilidad hídrica nacional para el año 2012 de acuerdo a los objetivos planteados en el PECC (SEMARNAT, 2009). Se seleccionó en la parte norte la cuenca del río Conchos; al centro la cuenca Lerma-Chapala y en el sur, la cuenca del río Grijalva (hasta la presa Peñitas). Características generales de las cuencas bajo estudio se presentan en la cuadro 4.5.

**Cuadro 4.5 Cuencas bajo estudio.**

Cuenca	Área (Km <sup>2</sup> )	Clima preponderante	Precipitación anual <sup>1</sup> (mm)
Río Conchos	67,177	Semidesértico	363
Lerma-Chapala	54,450 <sup>2</sup>	Templado	714
Grijalva	36,773	Húmedo	1,870

<sup>1</sup> SEDEPECC (IMTA, 2009)

<sup>2</sup> Incluye las cuencas cerradas de los lagos de Pátzcuaro, Cuitzeo y Yuriria

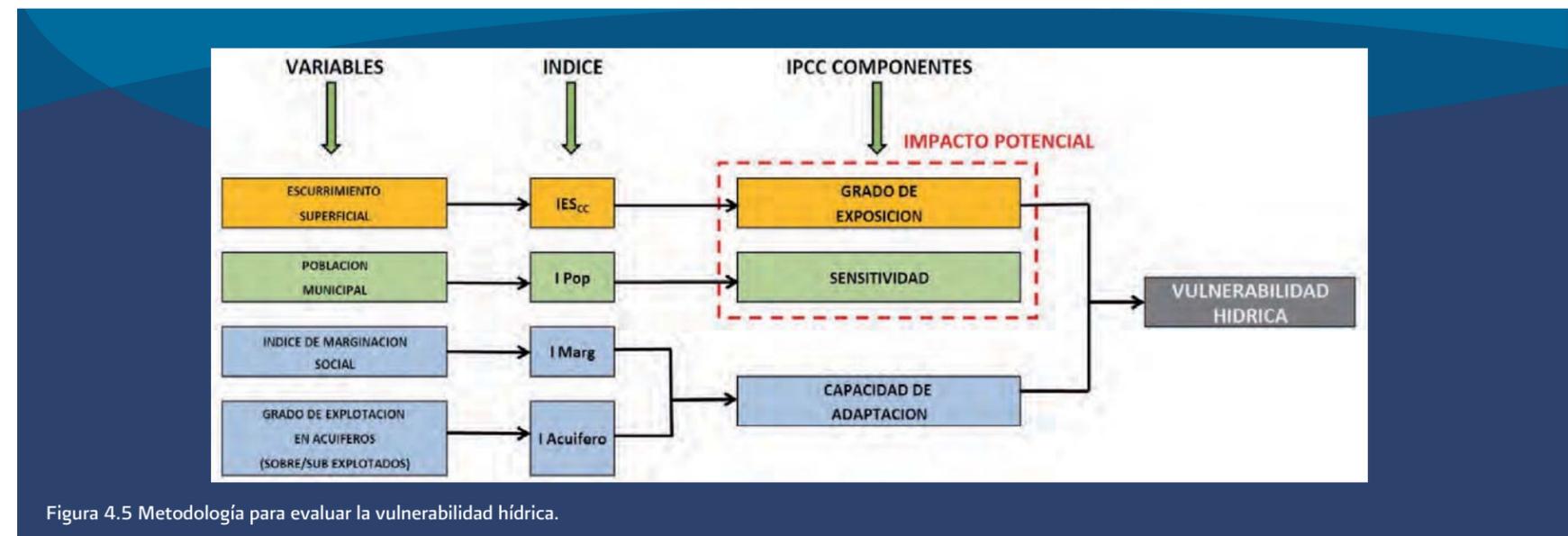


Figura 4.5 Metodología para evaluar la vulnerabilidad hídrica.

La ubicación de las tres cuencas en el territorio nacional se muestra en el mapa 4.1. Mientras que un mapa regional de ubicación de cada cuenca se muestra en los mapas 4.2, 4.8 y 4.14.

## Cuenca del río Conchos

### Localización

La cuenca del río Conchos comprende aproximadamente 67,000 km<sup>2</sup> y es la más importante dentro de la Región Hidrológica-Administrativa VI Río Bravo. Representa alrededor del 14% del área total de la cuenca del río Bravo (Kelly, 2001). El río Conchos es uno de los más importantes del norte de México y la principal corriente superficial del árido estado de Chihuahua (Rocha, 2005). La red de corrientes se origina en la Sierra Madre Occidental (Sierra Tarahumara) y el río Conchos cruza las llanuras del desierto chihuahuense. La confluencia con el río Bravo se ubica junto a la ciudad fronteriza de Ojinaga (mapa 4.2). Se estima que el río Conchos tiene una longitud de 750 km y con una dirección predominante este/noreste.

### Clima

La precipitación media anual es de 363 mm (IMTA, 2009). Sin embargo, en la parte alta de la cuenca donde se localiza la Sierra Tarahumara se presentan láminas anuales de hasta 700 mm, mientras que la región con mínima precipitación de aproximadamente 250 mm por año se ubica en la parte media-baja de la cuenca, aguas abajo de la presa Luis L. León (mapa 4.3).

### Hidrografía

Recurrentes sequías en la zona 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. La disponibilidad de agua se estima en 4,077 Mm<sup>3</sup>, considerando sus dos fuentes de abastecimiento: por un lado, 2,714 Mm<sup>3</sup> provenientes de escurrimientos superficiales vírgenes y 1,363 Mm<sup>3</sup> correspondientes a agua subterránea (CNA, 1997).

En la cuenca del río Conchos existe una importante infraestructura hidroagrícola para el manejo del agua, en los tres distritos de riego existe una extensa red de canales que cubre una longitud de 1,727 km, donde 1,074 km (62.2 %) están revestidos y 652 km (37.8 %) son de tierra (Jiménez, 2002). El cuadro 4.6 presenta las características de las principales presas en la cuenca del río Conchos

(CONAGUA, 2010). El aprovechamiento hidráulico más importante del sistema es la presa La Boquilla, una de las más antiguas en México.

**Cuadro 4.6 Presas de mayor importancia en la cuenca del río Conchos.**

Presa (Nombre común)	Año Terminado	Capacidad (Mm <sup>3</sup> )	Altura (m)	Usos	Operación	Área de drenaje (Km <sup>2</sup> )
La Boquilla (Lago Toronto)	1916	2,774	80	Riego, hidroeléctrica	CONAGUA	20,714
Francisco I. Madero (Las Vírgenes)	1949	343	57	Riego, control de inundaciones	DR 005	10,607
Luis L. León (El Granero)	1962	316	62	Riego, control de inundaciones	DR 090	13,573

### Resultados

En base a los escenarios de cambio propuestos en el cuadro 4.2, se estimó la precipitación histórica y la precipitación debida al cambio climático utilizando el SEDEPECC (IMTA, 2009). La cuenca se dividió en cinco subcuencas, tres de ellas representando las áreas de drenaje de las presas de almacenamiento mostradas en el cuadro 4.6. Las subcuencas se presentan en el cuadro 4.7, incluyendo áreas, volúmenes de escurrimiento y láminas medias de precipitación anual. El mapa 4.4 muestra la distribución de las cuencas.

**Cuadro 4.7 Subcuencas en la cuenca del río Conchos.**

Cuenca	Área de drenaje	Volumen histórico	Precipitación media anual
	(Km <sup>2</sup> )	(Mm <sup>3</sup> )	(mm)
Total	67,177.4	2,693	363.00
Sub-cuencas	Francisco I. Madero	10,606.6	425
	Luis L. León	13,572.9	418
	La Boquilla	20,714.0	1,035
	Río Florido	13,500.6	546
	Ojinaga	8,783.3	252

En todas las cuencas se estima que la precipitación media anual disminuirá en la medida en que se avanza hacia finales del siglo, en la figura 4.6 se muestran los resultados bajo el Escenario A1B. El Escenario A2 presenta un comportamiento similar (figura 4.7):

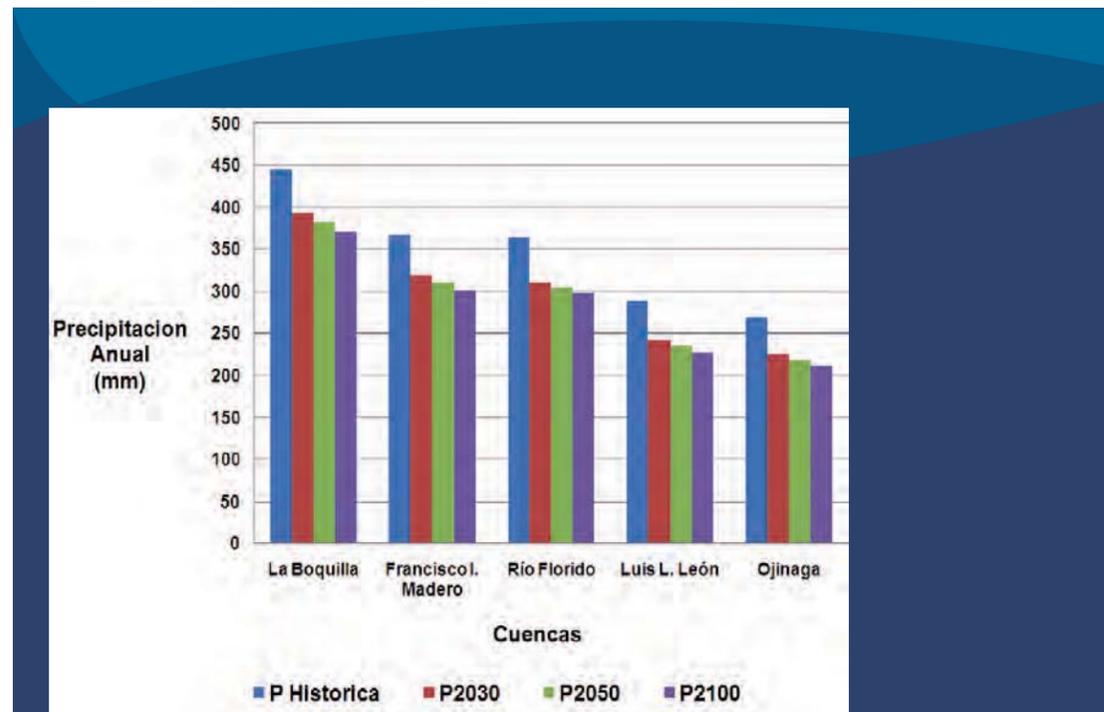


Figura 4.6 Efectos de la precipitación (Escenario A1B) en la cuenca del río Conchos

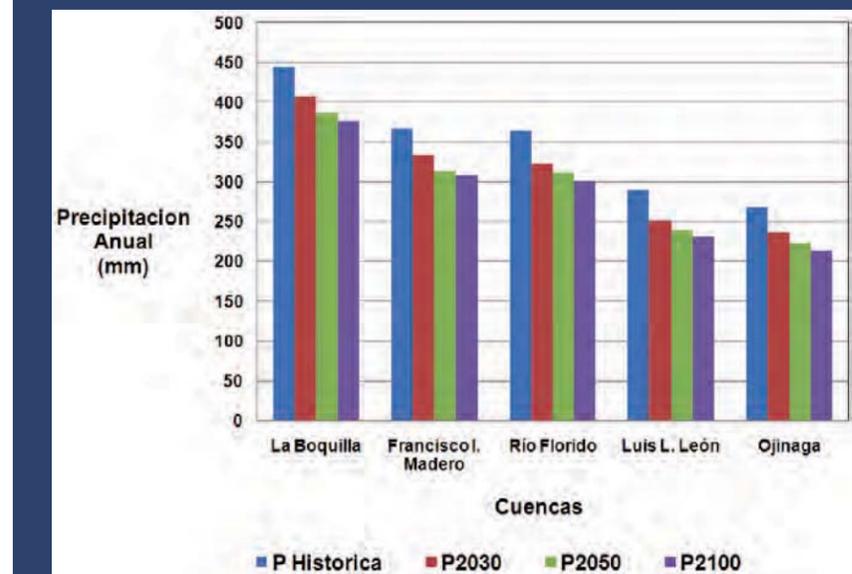


Figura 4.7 Efectos de la precipitación (Escenario A2) en la cuenca del río Conchos.

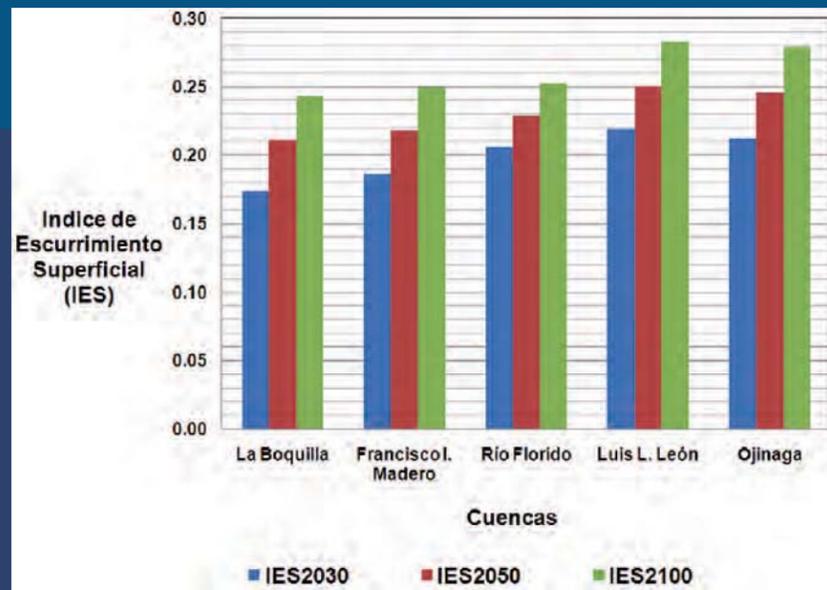


Figura 4.6 IES (Escenario A1B) en la cuenca del río Conchos.

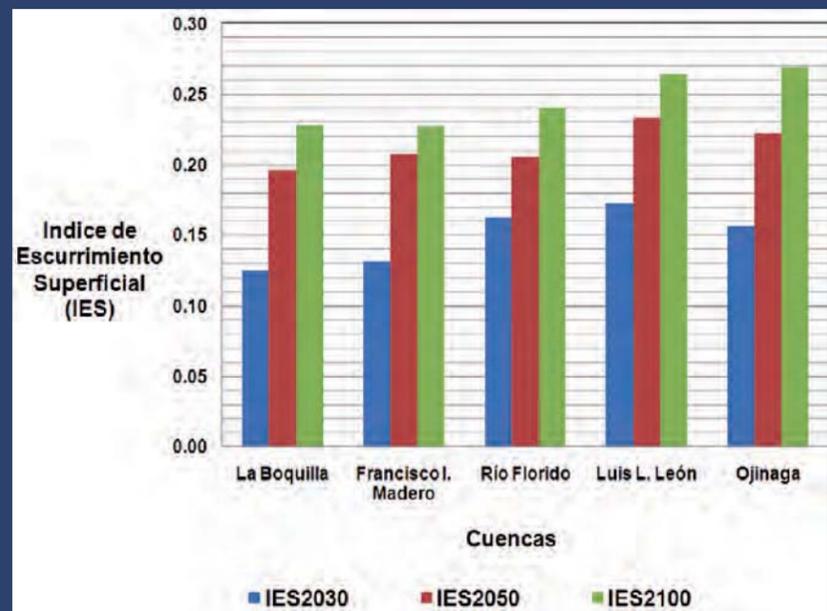


Figura 4.7 IES (Escenario A2) en la cuenca del río Conchos.

Los correspondientes Índices de Precipitación (ecuación 4.3) se calcularon y se presentan en el mapa 4.5 en donde se observa que el noreste de Chihuahua presenta los valores más altos y progresan gradualmente hacia finales de siglo, alcanzando valores máximos de 0.22 (Escenario A1B, año 2100).

A continuación se calcularon los Índices de Ecurrimiento Superficial ante el cambio climático (ecuación 4.5). Los resultados se muestran en la figura 4.6 y el mapa 4.6. El Escenario A1B resultó más desfavorable que el Escenario A2. Los valores más altos se presentan en la parte media baja de la cuenca (presa Luis L. León y Ojinaga), con IES de hasta 0.28 a finales de siglo. Debido a lo anterior, es probable que las condiciones desérticas aguas abajo de la presa Luis L. León se extiendan hacia la confluencia con el río Bravo.

De manera similar se estimaron los IES bajo un Escenario A2 el cual presentó un comportamiento similar al A1B, aunque los valores resultaron de menor magnitud (figura 4.7).

### Mapas de vulnerabilidad hídrica global

A partir de los IES calculados se estimó la vulnerabilidad hídrica global considerando los factores descritos en el subcapítulo 4.3. El mapa de vulnerabilidad hídrica global se muestra en el mapa 4.7. El análisis de vulnerabilidad muestra la zona metropolitana de la ciudad de Chihuahua como la más vulnerable; adicionalmente la ciudad de Delicias y zonas de riego adyacentes también muestran un alto grado de vulnerabilidad. En todos los escenarios de cambio climático se muestra un incremento gradual de vulnerabilidad a medida que se avanza hacia finales de siglo.

La zona de Chihuahua merece especial atención dado que depende del agua subterránea para satisfacer el 92% de sus necesidades. Por otro lado el acuífero Chihuahua-Sacramento que aporta el 65% se encuentra sobre-explotado (Comisión Nacional del Agua, 1997). Medidas de conservación y re-uso del agua en Chihuahua requieren acción inmediata con el propósito de satisfacer la demanda proyectada. Planes de contingencia ante las sequías necesitan desarrollarse e implementarse a la brevedad.

En el caso de la cuenca del río Conchos el 90% del volumen de agua se destina a usos agrícolas. En términos generales, las regiones destinadas a la agricultura pueden clasificarse en tres grandes áreas dependiendo de la confiabilidad en el suministro hídrico:

- i) *Zonas de temporal.* Cuya única fuente de abastecimiento constituye la precipitación pluvial.
- ii) *Zonas bajo riego.* Constituyen aquellas áreas cuya fuente de abastecimiento constituye un almacenamiento superficial o presa del que dependen, en gran medida, los distritos de riego.
- iii) *Unidades de riego.* Cuya fuente de abastecimiento la constituyen pozos. Existen 880 pozos que abastecen las unidades de riego (Jiménez, 2002). Sin embargo se carece de una base de datos espacial que permita su identificación geográfica.

Las zonas de temporal tienen el mayor grado de vulnerabilidad mientras que las unidades de riego, al disponer de una fuente relativamente confiable en el suministro de agua, resultan ser las menos vulnerables. El presente análisis consideró los grupos i) y ii). Tomando en cuenta las zonas bajo riego y de temporal se tienen, aproximadamente, 6,500 km<sup>2</sup>, de los cuales el 48% corresponden a zonas bajo riego y el 52% a zonas de temporal (cuadro 4.8).

Cuadro 4.8 Zonas agrícolas en la cuenca del río Conchos.

Cuenca	Área total	Zonas bajo riego	Zonas de temporal
	(Km <sup>2</sup> )	Area (Km <sup>2</sup> )	Area (Km <sup>2</sup> )
Presa La Boquilla	1,207.3	188.2	1019.1
Río Florido	1,744.7	1071.6	673.1
Presa Luis Leon	1,912.8	1630.5	282.4
Presa Fco. I. Madero	1,520.6	132.0	1388.6
Ojinaga	129.7	100.8	28.9
<b>Total =</b>	<b>6,515.2</b>	<b>3,123.1</b>	<b>3,392.1</b>

La mayor parte de las zonas bajo riego se ubican en las cuencas del río Florido y la presa Luis L. León y Ojinaga. Mientras que las zonas de temporal se ubican principalmente en las cuencas de la presas La Boquilla y Francisco I. Madero (figura 4.8).

Existen grandes distritos de riego (Hidalgo de Parral, Camargo-Jiménez, Delicias y el Bajo Río Conchos) donde se produce una variedad de cultivos como maíz, trigo, alfalfa, algodón, nuez y distintas frutas y hortalizas. Las dos principales zonas de riego: DR 103 Río Florido y DR 005 Ciudad Delicias se ubican sobre acuíferos sobreexplotados (CONAGUA, 2009). Lo anterior aumenta la vulnerabilidad de estas regiones agrícolas ante el cambio climático.

## Cuenca Lerma-Chapala

### Localización

La cuenca Lerma-Chapala se localiza en la parte central de México donde se extiende desde el nacimiento del río Lerma (a 4,600 msnm) hasta su desembocadura en el lago de Chapala (a 1,600 msnm) abarcando una extensión de 54,450 km<sup>2</sup>. Dentro de la cuenca se ubican algunas ciudades del centro de México: Querétaro, León, Toluca y Morelia, por mencionar algunas de las más importantes (mapa 4.8).

La cuenca Lerma-Chapala forma parte de la Región Hidrológica-Administrativa VIII denominada Lerma Santiago Pacífico (CONAGUA, 2009).

La cuenca comprende cinco estados de la república mexicana: Guanajuato, Michoacán, Jalisco, México y Querétaro que concentran el 15% de la población del país. La cuenca Lerma-Chapala mantiene patrones de desarrollo industrial y comercial en una extensa red que guarda una conexión muy estrecha con las dos ciudades más importantes del país: México y Guadalajara que propició un enorme crecimiento económico y demográfico de la cuenca lo que provocó un deterioro ambiental cuya rehabilitación representa un reto para la actual generación. El impacto del cambio climático en la cuenca Lerma-Chapala constituye una alta prioridad nacional.

### Clima

La cuenca Lerma-Chapala presenta una precipitación media anual de 714 mm (IMTA, 2009), la parte norte de la cuenca registra láminas de precipitación de 400 mm, mientras que en el sur se presentan valores de 1,000 mm (ver mapa 4.9). La cuenca es una región tropical con una temperatura promedio de 21 grados centígrados.

### Hidrografía

El río Lerma tiene una longitud aproximada de 750 Km y constituye la corriente principal de la cuenca. Los principales afluentes son los ríos La Gavia, Jaltepec, La Laja, Silao-Guanajuato, Turbio, Angulo y Duero. Considerando condiciones promedio, los escurrimientos superficiales son aprovechados casi en su totalidad ya sea para generación de energía, riego agrícola y abastecimiento a zonas urbanas, entre otros usos. Los escurrimientos superficiales se concentran en el río Lerma el cual desemboca en el lago de Chapala que tiene una longitud de 77 km y un ancho de 23 km, aportando un caudal medio de 2,150 Mm<sup>3</sup> (Maderey y Carrillo, 2005).

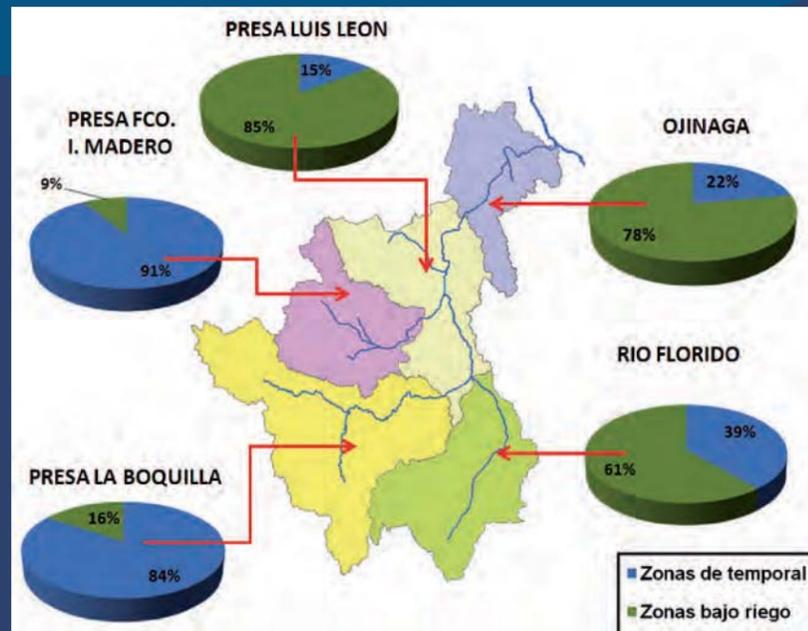


Figura 4.8 Distribución de zonas agrícolas en la cuenca del río Conchos.

En cuanto a los cultivos localizados en las unidades de riego que dependen en gran medida del agua del subsuelo y de acuerdo a los decrementos en escurrimiento superficial proyectados, las unidades de riego serán especialmente vulnerables ante el cambio climático.

En general, los decrementos proyectados en escurrimiento superficial y las correspondientes sequías reducirán la recarga de los acuíferos. Es muy probable que aumente la extracción de agua del subsuelo para remediar la carencia de escurrimientos superficiales al grado de incrementar, aún más, el estado de explotación de los acuíferos.

Finalmente, el crecimiento poblacional natural y el proceso de industrialización en la región debido a la integración de las economías mexicana y estadounidense generaron una fuerte competencia entre los diferentes usos del agua (doméstico, industrial y agrícola).

El lago de Chapala es el mayor cuerpo de agua en México y el tercero en América Latina. La máxima capacidad de almacenamiento del lago es de 8.13 km<sup>3</sup> y el área superficial es de aproximadamente 110,000 ha. El lago presenta una profundidad promedio de 7.20 m, con un máximo de 16 m. Debido a la desecación de la parte oriental del lago con fines de uso agrícola, el río Duero, que anteriormente desembocaba en el lago, fue desviado hacia el río Lerma.

### Resultados

De manera similar a la cuenca del río Conchos, tomando como base los escenarios de cambio propuestos en el cuadro 4.2, se estimó la precipitación histórica y la precipitación debida al cambio climático utilizando el SEDEPECC (IMTA, 2009).

El mapa 4.10 muestra las catorce subcuencas utilizadas en el presente análisis, el criterio de división fue con el propósito de evaluar el impacto del cambio climático en los principales cuerpos de agua. Es por ello que el análisis incluyó las cuencas cerradas de Pátzcuaro, Cuitzeo y Yuriria, que aunque no aportan escurrimiento directo al lago de Chapala, forman parte de la Región Hidrológica Lerma-Santiago (CONAGUA, 2009) y se consideró importante incluirlas en el presente estudio. Las cuencas se presentan en el cuadro 4.9, incluyendo áreas, volúmenes de escurrimiento y láminas medias de precipitación anual.

Cuadro 4.9 Subcuencas en la cuenca Lerma-Chapala.

Cuenca	Área de drenaje	Volumen histórico	Precipitación media anual	
	(Km <sup>2</sup> )	(Mm <sup>3</sup> )	(mm)	
Total	48,446.9	6,109	714.1	
Sub-cuencas	Lago de Chapala	6,306.2	853	796.7
	Río Zula	2,125.4	287	772.0
	Río Duero	2,802.9	404	807.8
	Río Turbio	3,451.5	298	587.3
	Río La Laja	6,868.5	426	465.0
	Lerma Central	8,884.7	888	647.1
	Presa Melchor Ocampo	2,046.9	255	715.3
	Querétaro-Salamanca	7,410.9	662	595.9
	Presa Solís	2,983.0	386	737.9
	Presa Tepuxtepec	3,488.9	465	754.3
	Presa Alzate	2,078.1	383	913.3
	Lago de Pátzcuaro <sup>1</sup>	917.9	127	759.0
	Lago de Cuitzeo <sup>1</sup>	3,865.7	538	776.8
Laguna de Yuriria <sup>1</sup>	1,219.4	137	668.7	

<sup>1</sup> Cuenclas cerradas (sin escurrimiento superficial hacia el lago de Chapala).

Al igual que en la cuenca del río Conchos, los modelos de circulación general estiman que la precipitación media anual disminuya en toda la cuenca a medida que se avance hacia finales del siglo, en la figura 4.9 se muestran los resultados bajo el Escenario A1B.

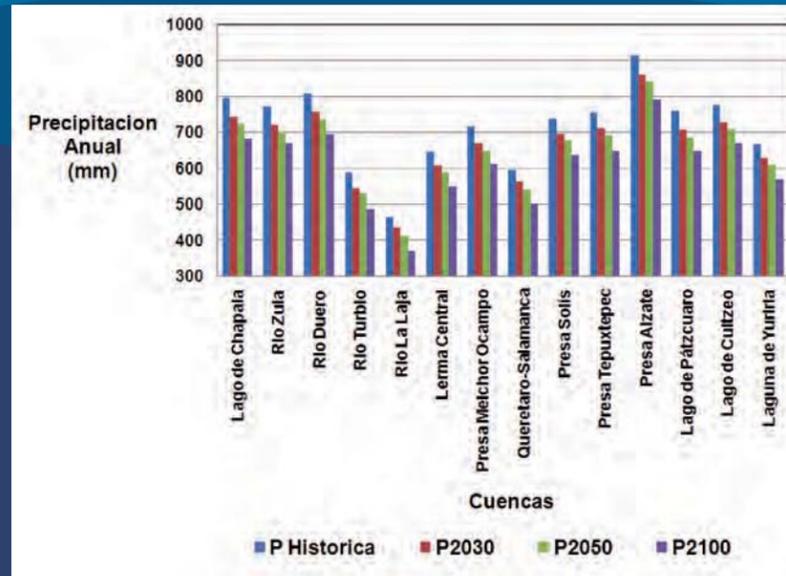


Figura 4.9 Efectos de la precipitación (Escenario A1B) en la cuenca Lerma-Chapala.

El Escenario A2 presenta un comportamiento similar (figura 4.10):

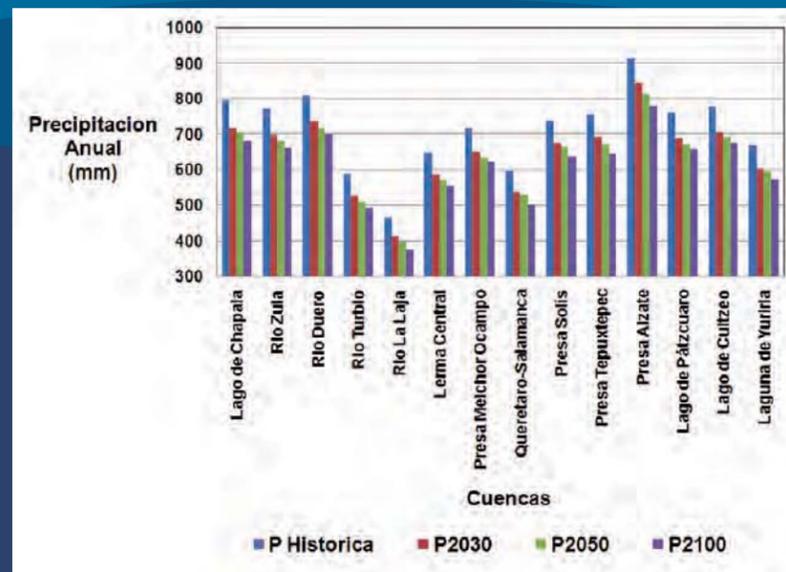


Figura 4.10 Efectos de la precipitación (Escenario A2) en la cuenca Lerma-Chapala.

Se calcularon los correspondientes Índices de Precipitación (ecuación 4.3) y se presentan en el mapa 4.11. El extremo norte de la cuenca muestra valores máximos del orden de 0.24 (Escenario A1B, Año 2100). Únicamente por decremento en precipitación se identifican las ciudades de León y Guanajuato como las más vulnerables.

A continuación se calcularon los Índices de Escurrimiento Superficial ante el cambio climático (ecuación 4.5). Los resultados se muestran en la figura 4.11 y el mapa 4.12. En forma similar a la cuenca del río Conchos, el Escenario A1B resultó más desfavorable que el Escenario A2, sin embargo los valores máximos de IES fueron ligeramente más altos. La sub-cuenca de la presa Ignacio Allende presenta el IES máximo de 0.29 hacia finales de siglo para el escenario A1B.

De manera similar se estimaron los IES bajo un Escenario A2, el cual presentó un comportamiento similar al A1B, aunque los valores registraron una menor magnitud (figura 4.12).

### Mapas de vulnerabilidad hídrica global

A partir de los IES calculados se estimó la vulnerabilidad hídrica global considerando los factores descritos en el subcapítulo 4.3. El mapa de vulnerabilidad hídrica global se muestra en el mapa 4.13. La región al norte de la cuenca presenta los mayores niveles de vulnerabilidad donde se ubican las ciudades de León y Guanajuato.

La totalidad de las ciudades al norte de la cuenca (León, Guanajuato, Salamanca, Celaya y Querétaro) se ubican sobre acuíferos sobreexplotados (CONAGUA, 2009). En la región anterior la precipitación media anual de 550 mm (Atlas del Agua en México-CONAGUA, 2009) es por ello que aquí los escurrimientos superficiales no son suficientes para satisfacer la demanda de agua de las actividades industriales y domésticas de este corredor industrial y por ello se han abatido los mantos freáticos. Los ríos se encuentran altamente contaminados por las descargas industriales, en León por ejemplo la industria del cuero y el calzado deteriora gravemente el equilibrio ecológico, dado que consumen altos volúmenes de agua y descargan altas concentraciones de químicos hacia las corrientes superficiales.

### Cuenca del río Grijalva

#### Localización

La cuenca transfronteriza del río Grijalva, que nace en Guatemala y cruza principalmente el estado de Chiapas, se ubica al sureste de México.

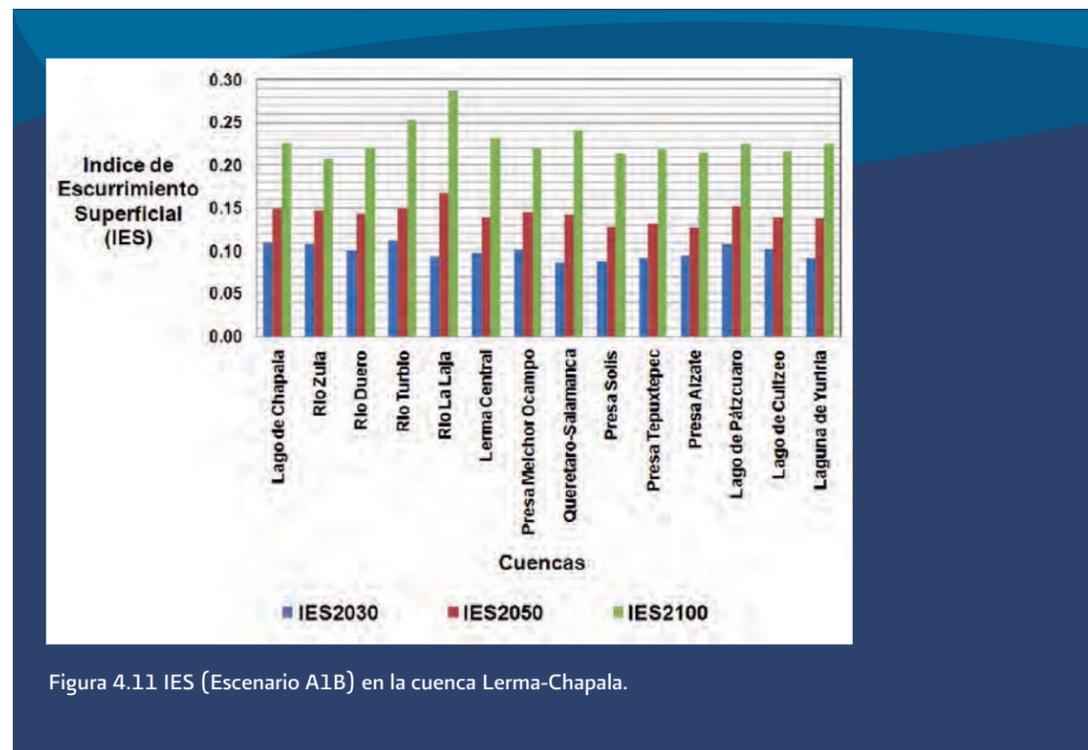


Figura 4.11 IES (Escenario A1B) en la cuenca Lerma-Chapala.

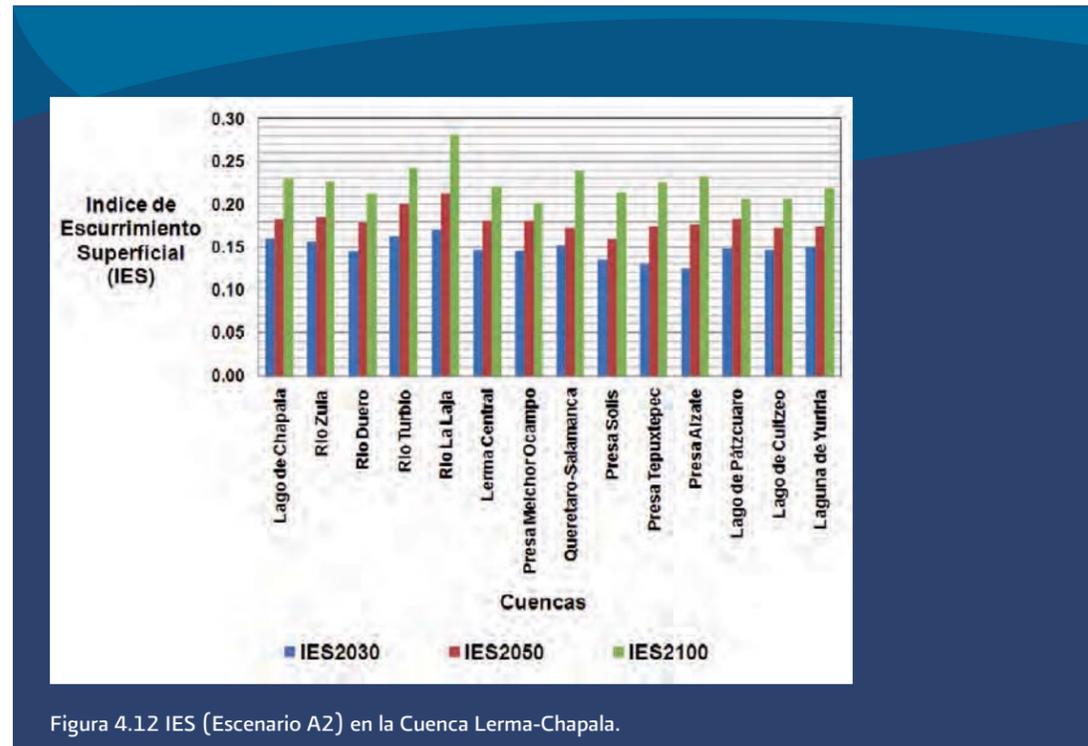


Figura 4.12 IES (Escenario A2) en la Cuenca Lerma-Chapala.

La cuenca del Grijalva forma parte de la Región Hidrológica-Administrativa XI denominada Frontera Sur (CONAGUA, 2009). Orográficamente se sitúa en la Depresión Central de Chiapas en una extensa zona semiplana bordeada por la Sierra Madre, los Altos y las Montañas del Norte de Chiapas. El mapa 4.14 muestra la localización de la cuenca.

## Clima

Las condiciones del clima varían radicalmente conforme el Grijalva avanza río abajo. En la parte alta de la cuenca se ubica una de las zonas de mayor precipitación en el mundo con 4,200 mm anuales; las lluvias se presentan todo el año por influencia de sistemas tropicales y de invierno, estos últimos pueden generar lluvias de hasta 300 mm en 24 horas cada año (Rubio y Triana, 2006). Mientras, el resto de la cuenca tiene una precipitación media que oscila entre los 1,200 y 1,700 mm anuales, debido a que esta zona se ubica entre dos barreras meteorológicas: las zonas montañosas del norte y la costa de Chiapas, que bajo el efecto Föhn se generan condiciones secas, sin embargo a través de Guatemala la influencia de ondas del este provoca la mayor parte de la precipitación, donde el 95% de ella es de origen tropical (Rubio y Triana, 2006). La precipitación media anual es de 1,870 mm (IMTA, 2009). El mapa 4.15 muestra la distribución espacial de la precipitación histórica.

## Hidrografía

El volumen de escurrimiento medio anual en la cuenca del Grijalva es de 46,796 Mm<sup>3</sup>, siendo uno de los más caudalosos del país. Mientras que el volumen de escurrimiento medio anual en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta es de 117,546 Mm<sup>3</sup> (SEMARNAT, 2009).

El principal usuario del río Grijalva es el sector hidroeléctrico, toda vez que en esta cuenca se ubica el sistema hidroeléctrico más importante de México. En la cuenca se han construido cuatro grandes presas. Por orden histórico de construcción: Malpaso (Netzahualcáyotl), La Angostura (Belisario Domínguez), Chicoasén (Manuel Moreno Torres) y Peñitas (Ángel Albino Corzo). Estos cuatro embalses en cascada generan el 49% del total de energía hidroeléctrica en México (Hernández de la Torre, 2009). El área total de drenaje hasta la presa Peñitas es de 36,773 km<sup>2</sup>. La cuenca se dividió en cuatro sub-cuencas cada una representando el área de drenaje de las centrales hidroeléctricas. El mapa 4.14 muestra la distribución espacial de las sub-cuencas.

En el cuadro 4.10 se presentan datos generales del sistema hidroeléctrico donde resalta la importancia de la presa Chicoasén en términos de generación. Sin embargo el área de la presa La Angostura representa el 50% del total.

**Cuadro 4.10 Datos de las presas hidroeléctricas en el río Grijalva (CFE, 2010).**

Presa	Año de construcción	NAMO <sup>1</sup>	NAME <sup>1</sup>	Volumen útil máximo	% del Volumen respecto al de Angostura	Área de drenaje	Precipitaciónn media anual <sup>2</sup>	Volumen de escurrimiento	Capacidad efectiva	Generación bruta
		(msnm)	(msnm)	(Mm <sup>3</sup> )	(Mm <sup>3</sup> )	(Km <sup>2</sup> )	(mm)	(Mm <sup>3</sup> )	MW	GWh
Malpaso	1964	182.5	188.0	9,317	70.75	9,211	1,407	8,926	1,080	4,220
La Angostura	1975	533.0	539.5	13,170	100.00	18,707	2,244	28,184	900	3,297
Chicoasén	1980	392.5	395.0	216	1.64	7,597	1,393	7,516	2,400	6,682
Peñitas	1987	87.4	95.5	130	0.99	1,258	2,569	2,170	420	1,967

<sup>1</sup> Con base en la estadística de la muestra histórica 1952-2008 (CFE, 2010).

<sup>2</sup> Estimados a partir de datos del SEDEPECC (IMTA, 2009).

## Resultados

Las láminas anuales de precipitación muestran una gran variación entre las sub-cuencas, en Peñitas, por ejemplo, se observan valores de 2,500 mm, mientras que en Malpaso y Chicoasén la precipitación es del orden de 1,400 mm. El análisis por cambio climático indica que la precipitación anual tenderá a disminuir en las cuatro cuencas (figuras 4.13 y 4.14).

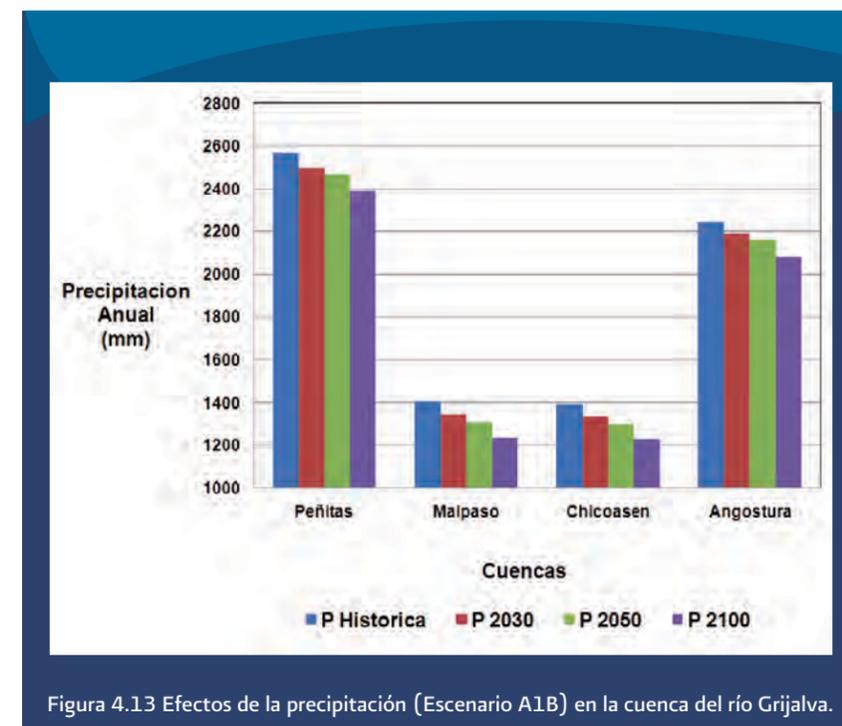


Figura 4.13 Efectos de la precipitación (Escenario A1B) en la cuenca del río Grijalva.

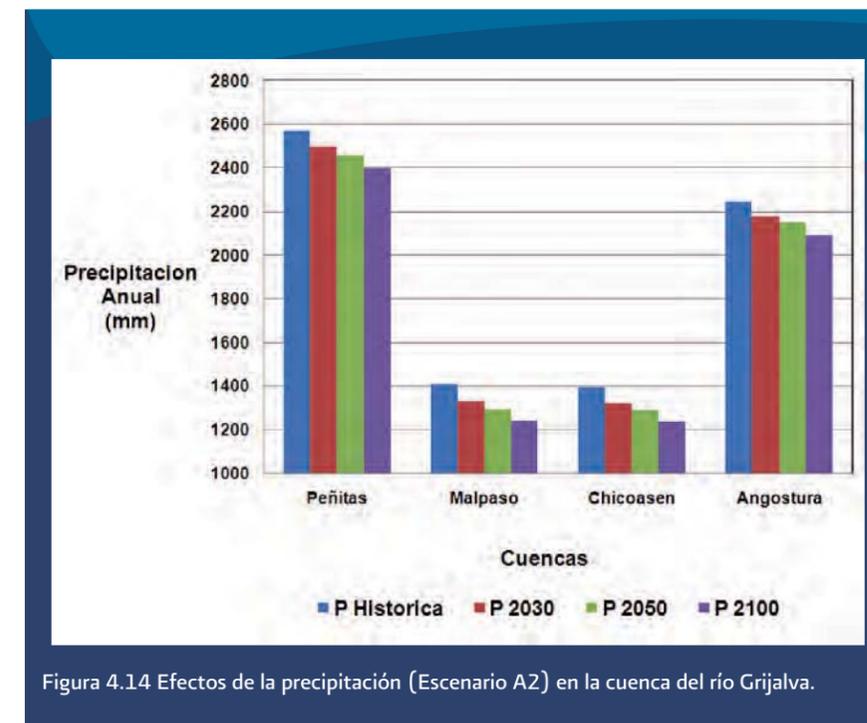


Figura 4.14 Efectos de la precipitación (Escenario A2) en la cuenca del río Grijalva.

Los correspondientes Índices de Precipitación (ecuación 4.3) se presentan en el mapa 4.16, al igual que las cuencas del río Conchos y el Lerma-Chapala. Los valores aumentan a medida que se avanza hacia finales del siglo. Sin embargo, los decrementos en la precipitación son menores. No existe una diferencia significativa entre los escenarios A1B y A2, sin embargo el Escenario A1B presenta en general valores ligeramente mayores. Se encontraron valores máximos de 0.17 para el año 2100.

El cálculo de los IES (ecuación 4.5), nos permite observar que las centrales hidroeléctricas de Malpaso y Chicoasén presentan los valores más altos. El mapa 4.17 despliega los IES para los escenarios analizados. Sin embargo, los IES en la cuenca del río Grijalva son mucho menores a los IES de las cuencas del río Conchos y del Lerma-Chapala. Las figuras 4.15 y 4.16 muestran los IES para los escenarios de cambio climático, A1B y A2, respectivamente.

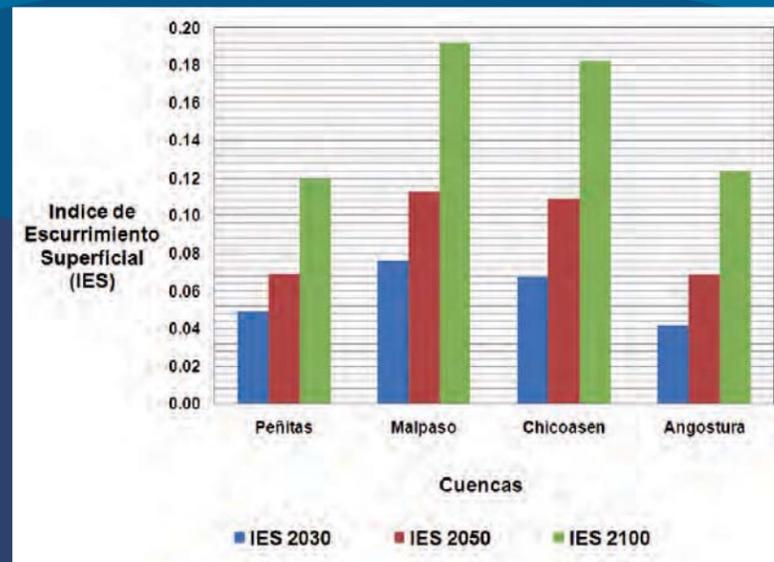


Figura 4.15 IES (Escenario A1B) en la cuenca del río Grijalva.

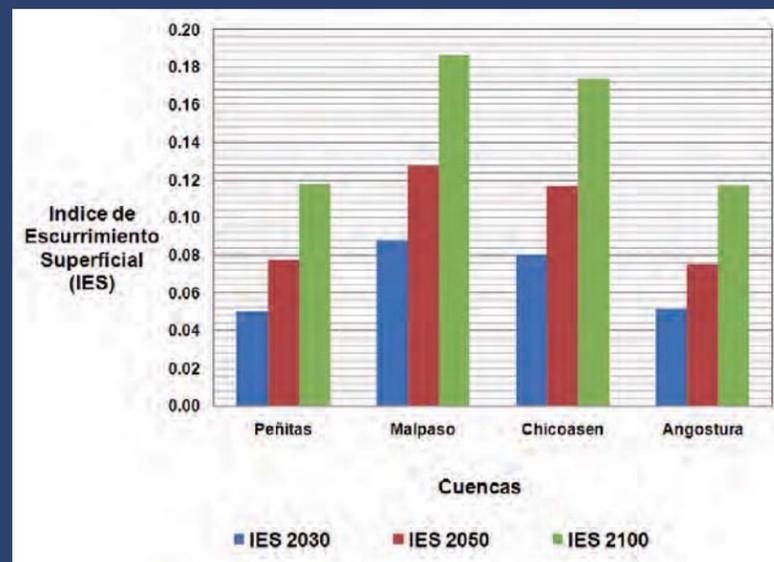


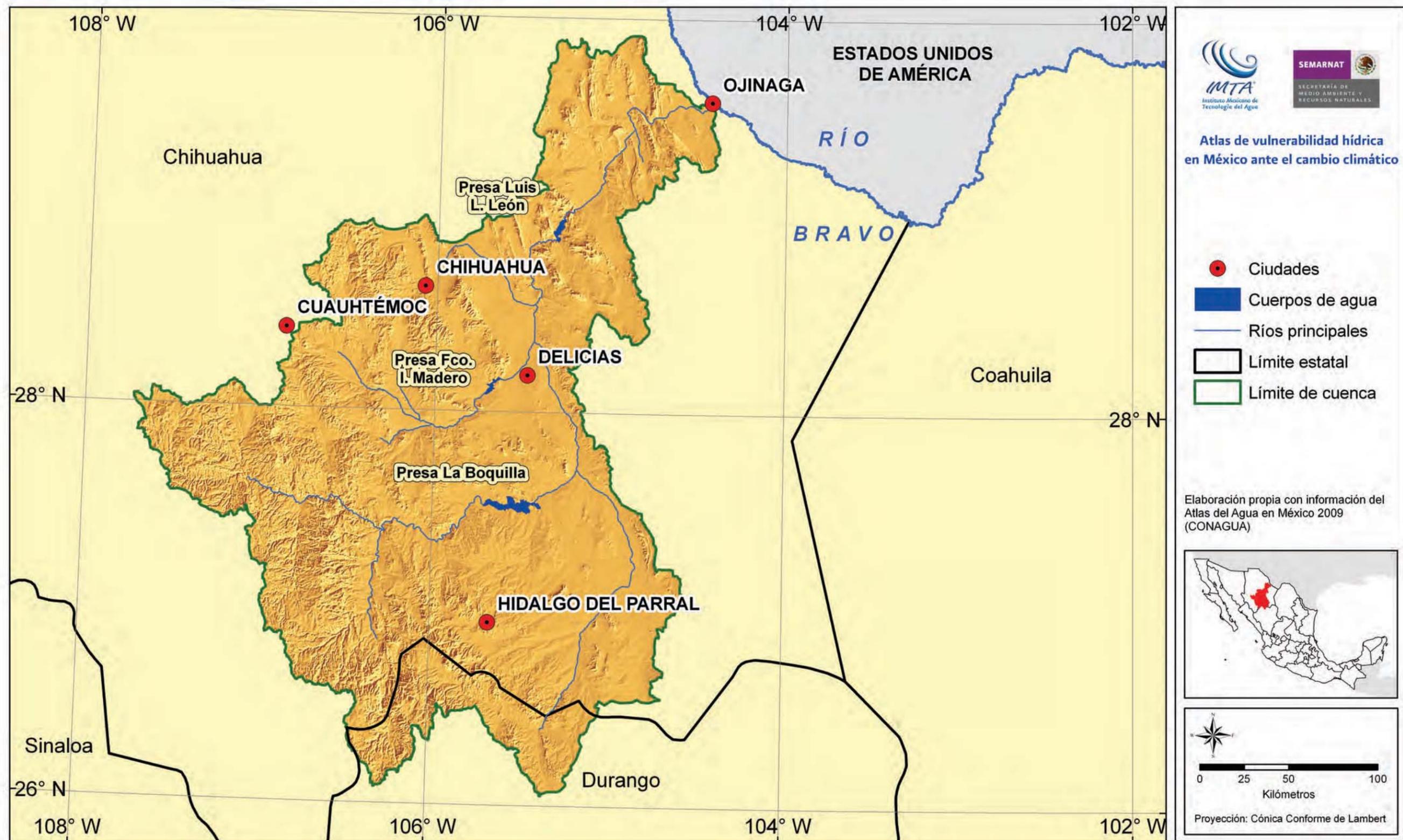
Figura 4.16 IES (Escenario A2) en la cuenca del río Grijalva.

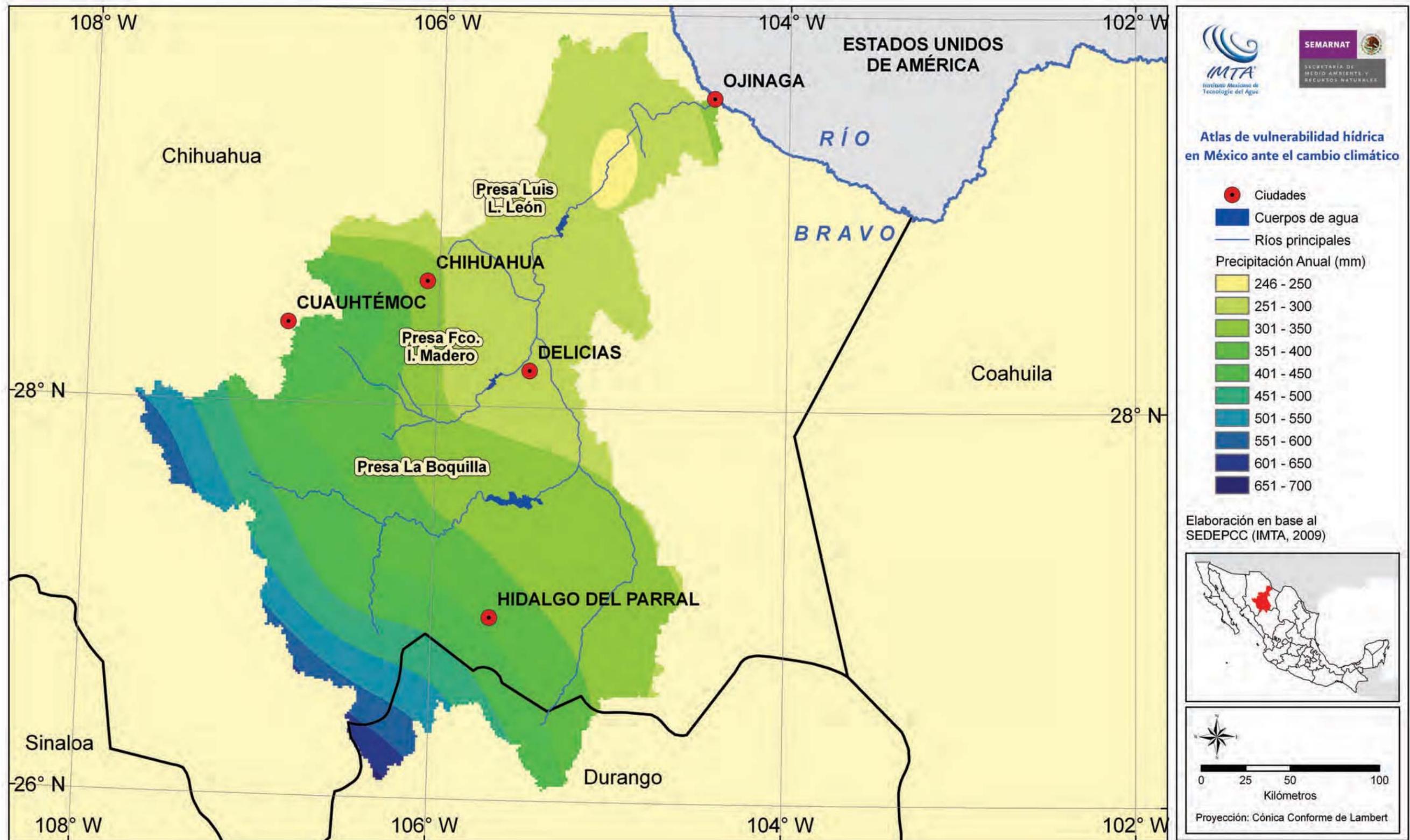
### Mapas de vulnerabilidad hídrica global

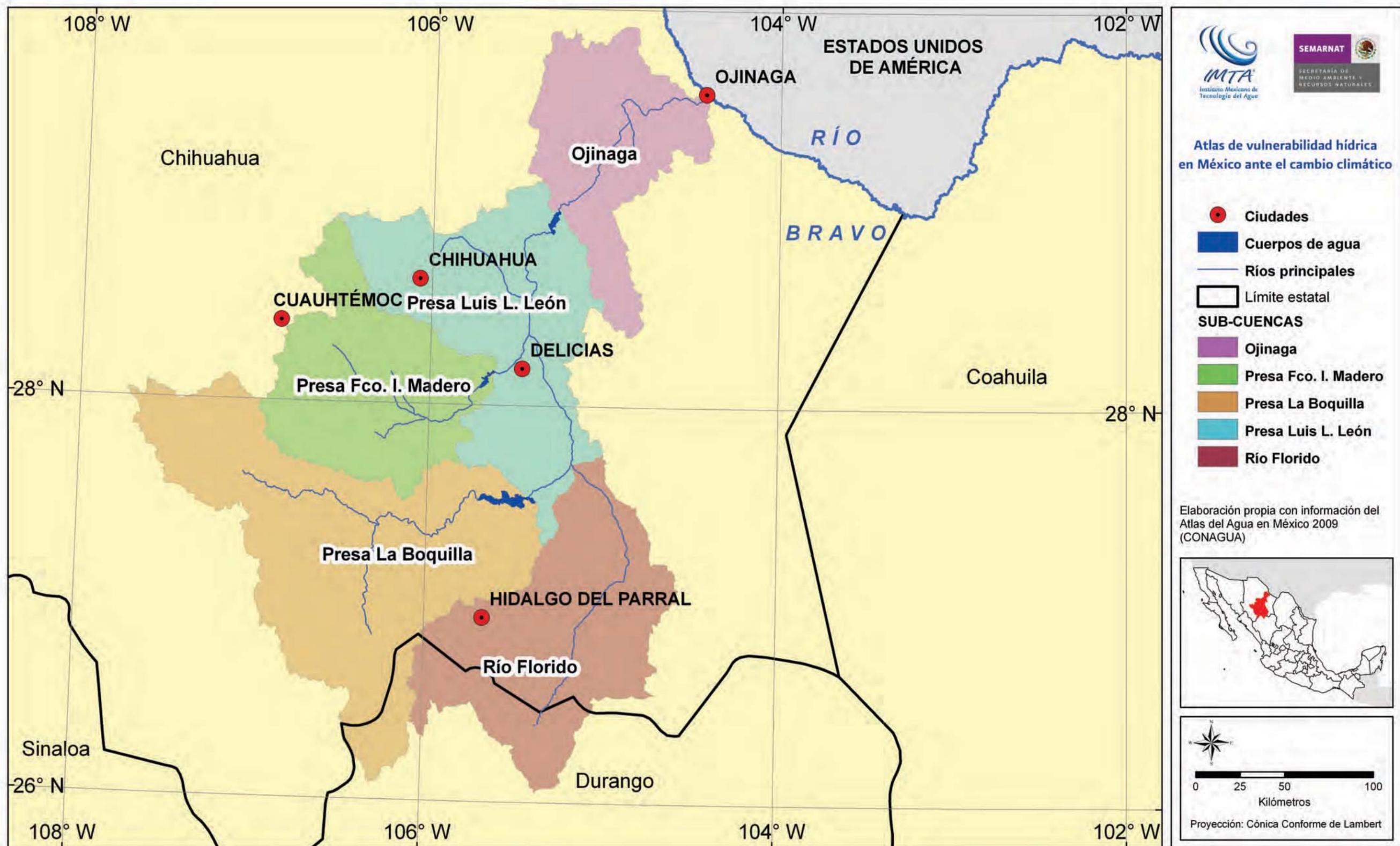
A partir de los IES calculados, se estimó la vulnerabilidad hídrica global considerando los factores descritos en el apartado 4.3. Los mapas de vulnerabilidad hídrica global se muestran en el mapa 4.18. Los decrementos en escurrimiento anual estimados ante el cambio climático requerirán el aprovechamiento de fuentes alternas de energía para complementar la actual generación de energía hidroeléctrica. El Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 propone impulsar el uso eficiente de la energía así como la utilización de tecnologías que permitan disminuir el impacto ambiental generado por los combustibles fósiles tradicionales. De esta manera, se pretende conciliar las necesidades de consumo de energía de la sociedad con el cuidado de los recursos naturales. México cuenta con un importante potencial en energías renovables.

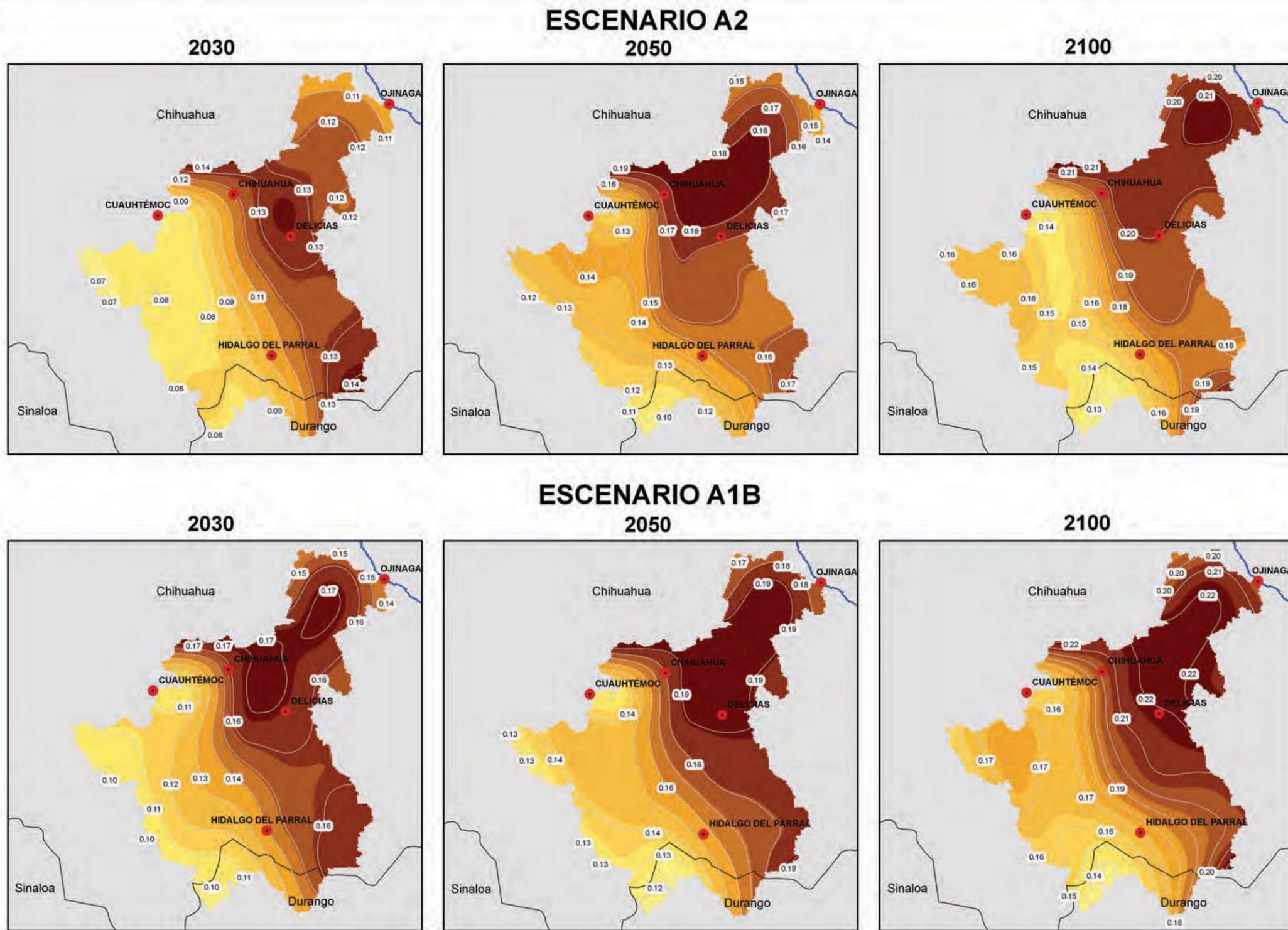
La Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene planeada la explotación de la energía eólica en la región del istmo de Tehuantepec mediante las centrales eólicas Oaxaca I, II, III y IV y otros proyectos de autoabastecimiento, en total se busca integrar 1,897 MW de capacidad de generación (CFE, 2010). Dentro de este esquema se aplicará una estrategia de coordinación entre la generación eólica y la correspondiente a las centrales hidroeléctricas del Grijalva, es decir que cuando exista producción eólica alta, se reducirá la generación en el sistema del Grijalva. Los planes de aprovechamiento de energía eólica necesitarán coordinarse con los decrementos estimados en escurrimiento superficial. Se estima que se presenten a causa del cambio climático. Dadas las altas precipitaciones, la cuenca del río Grijalva no presenta retos en cuanto al suministro de agua para las poblaciones dentro de la cuenca. Dado que se proyecta una disminución en la generación hidroeléctrica, los volúmenes menores en las presas permitirán tener volúmenes para control de avenidas y proteger a la ciudad de Villahermosa, Tabasco, localizada aguas debajo de la presa Peñitas.









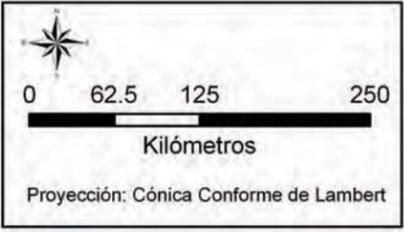


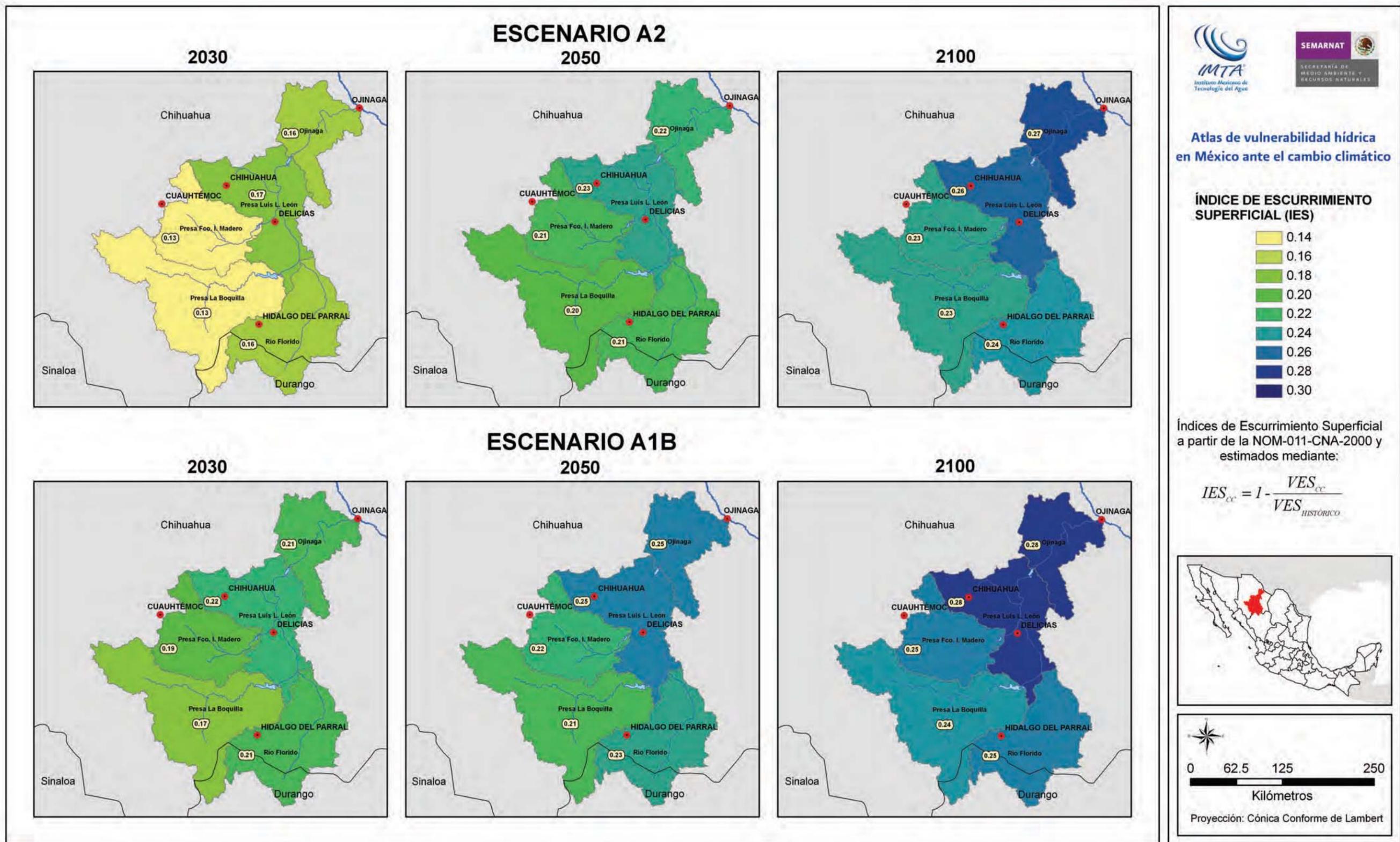
Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

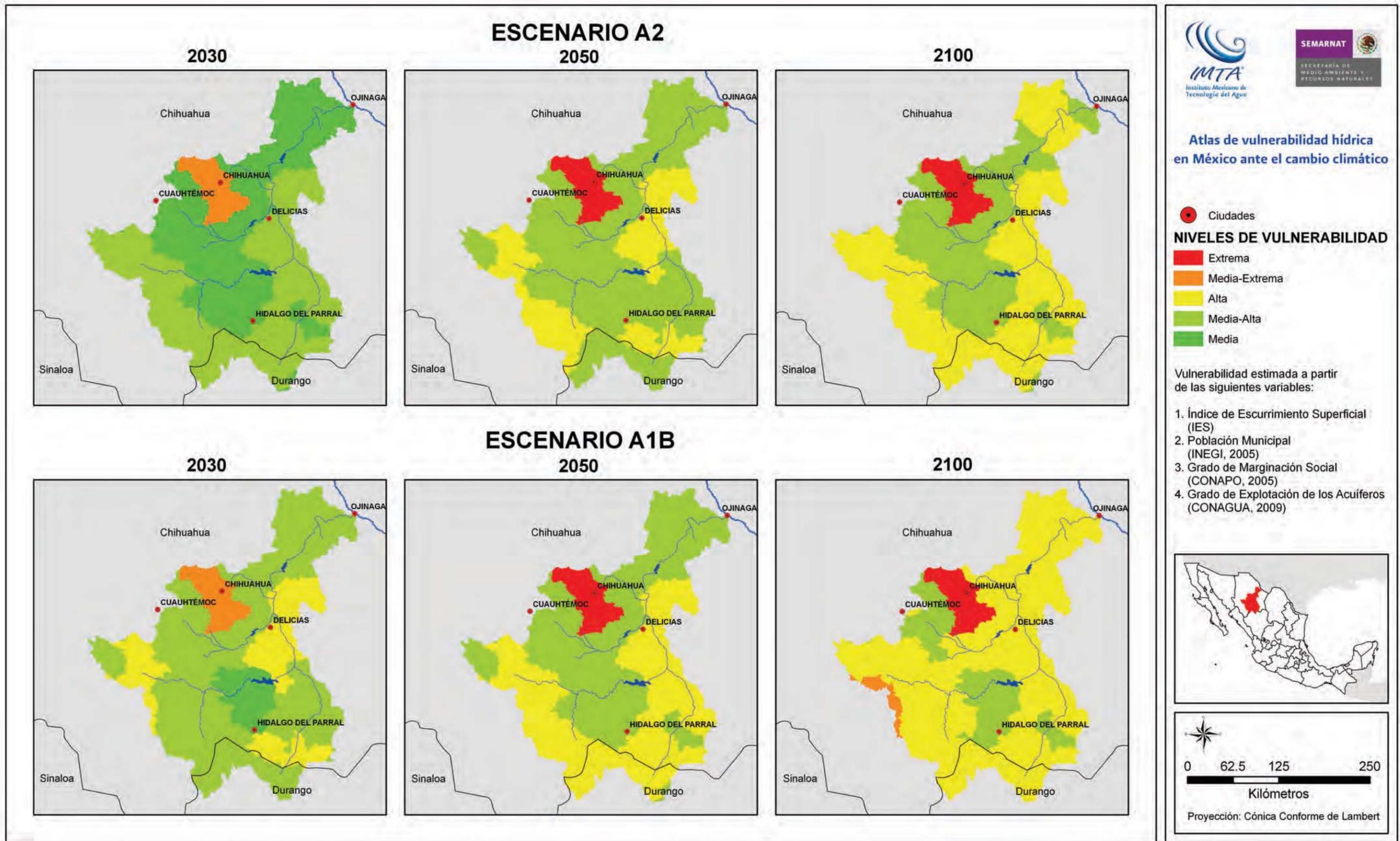
Índices de precipitación

Índices de Precipitación estimados mediante:

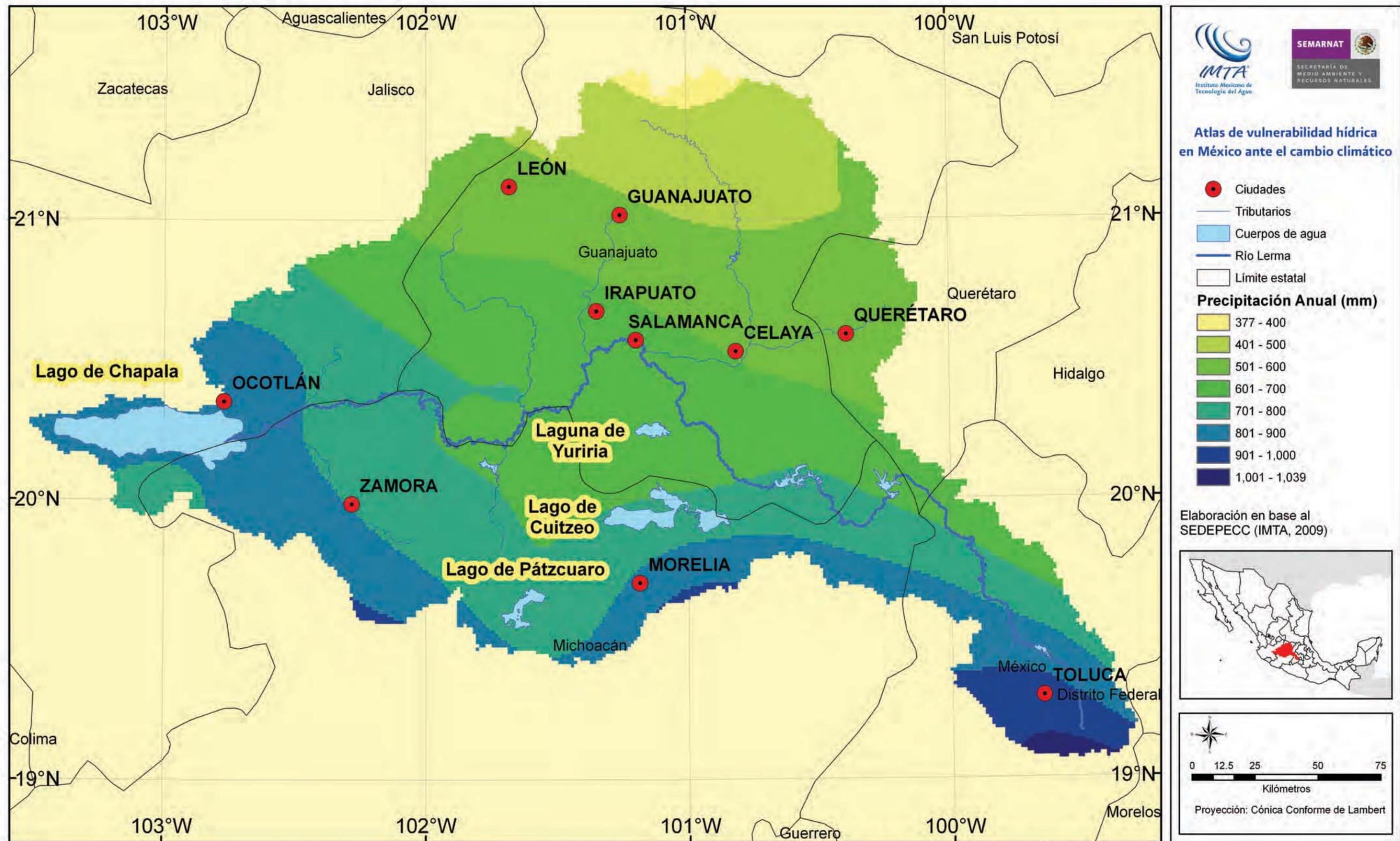
$$IP_{cc} = 1 - \frac{P_{cc}}{P_{HISTORICA}}$$

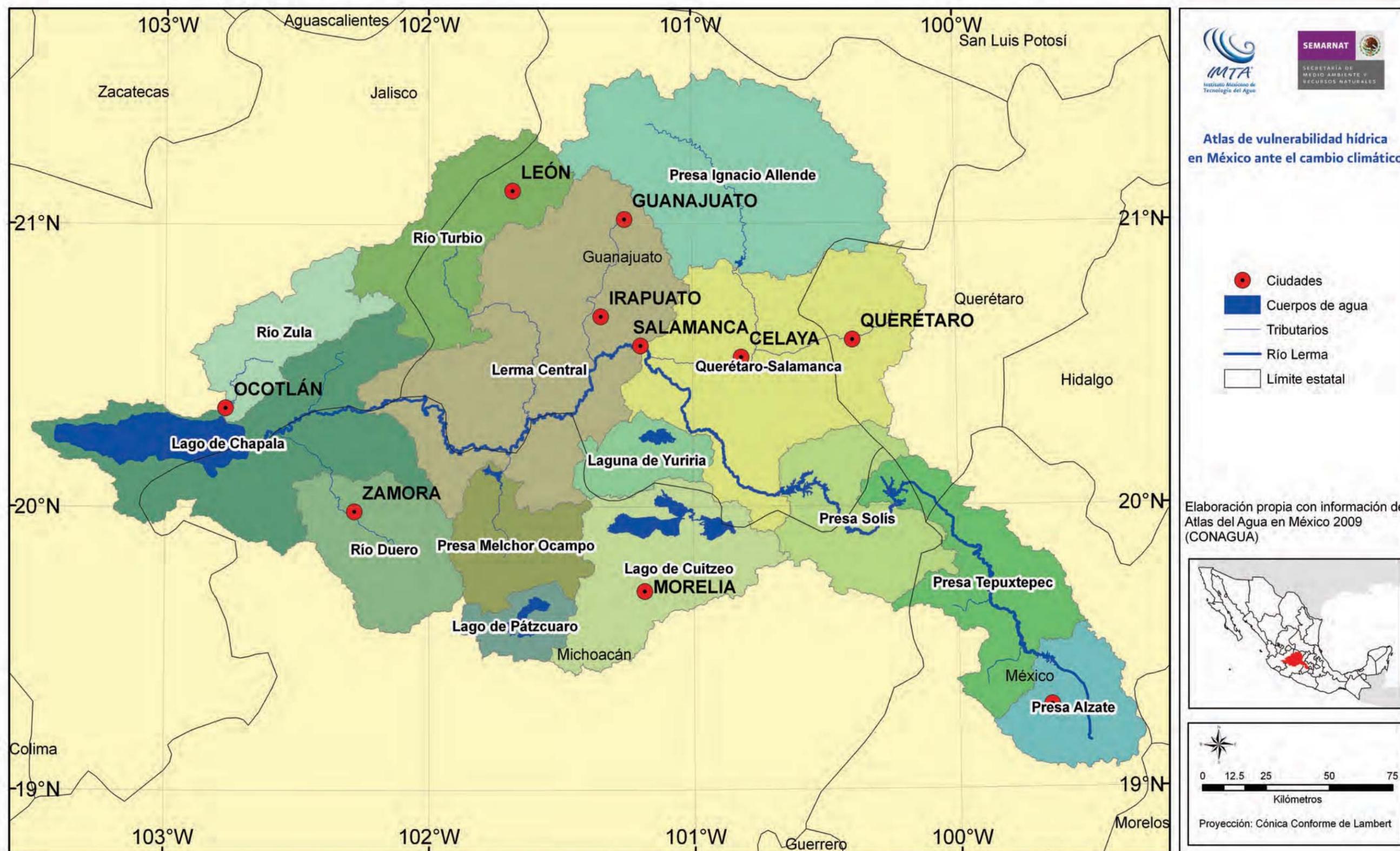












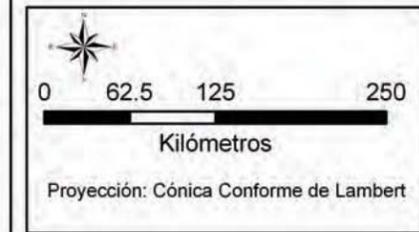
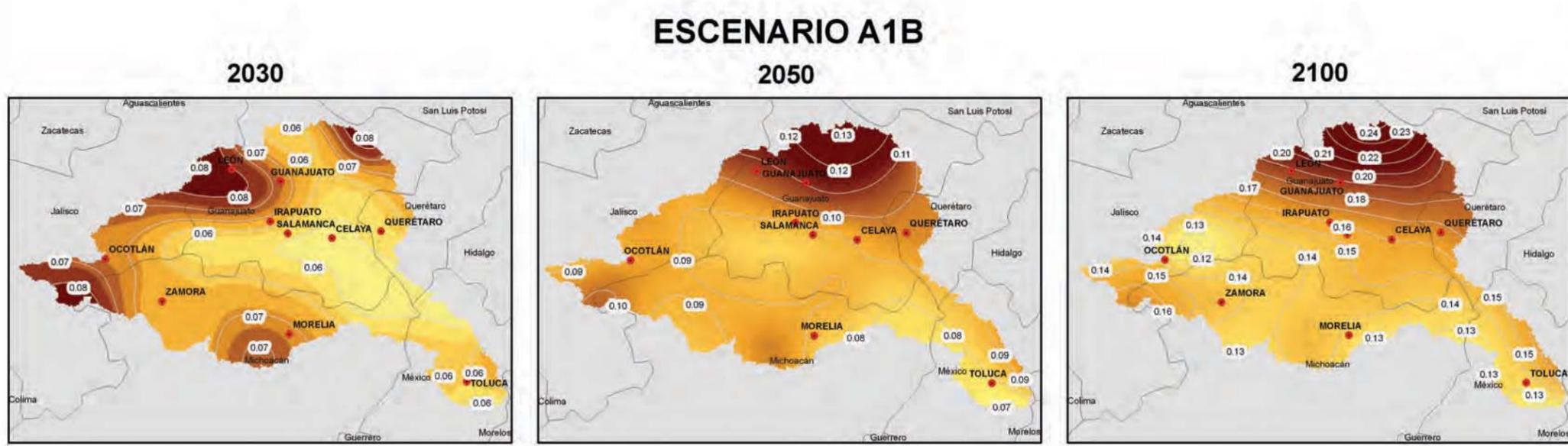
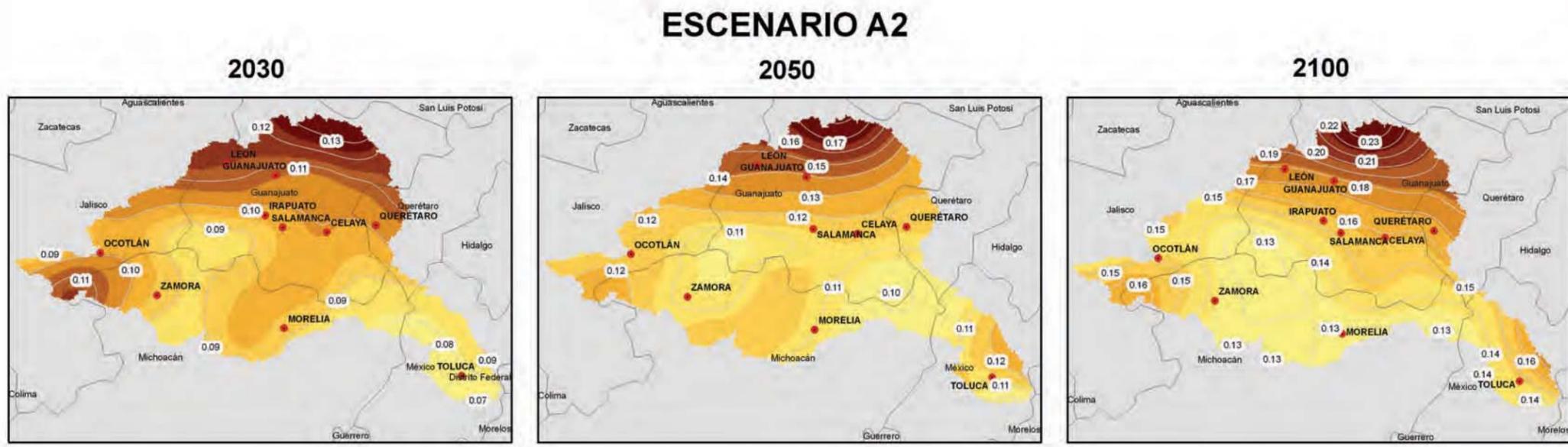


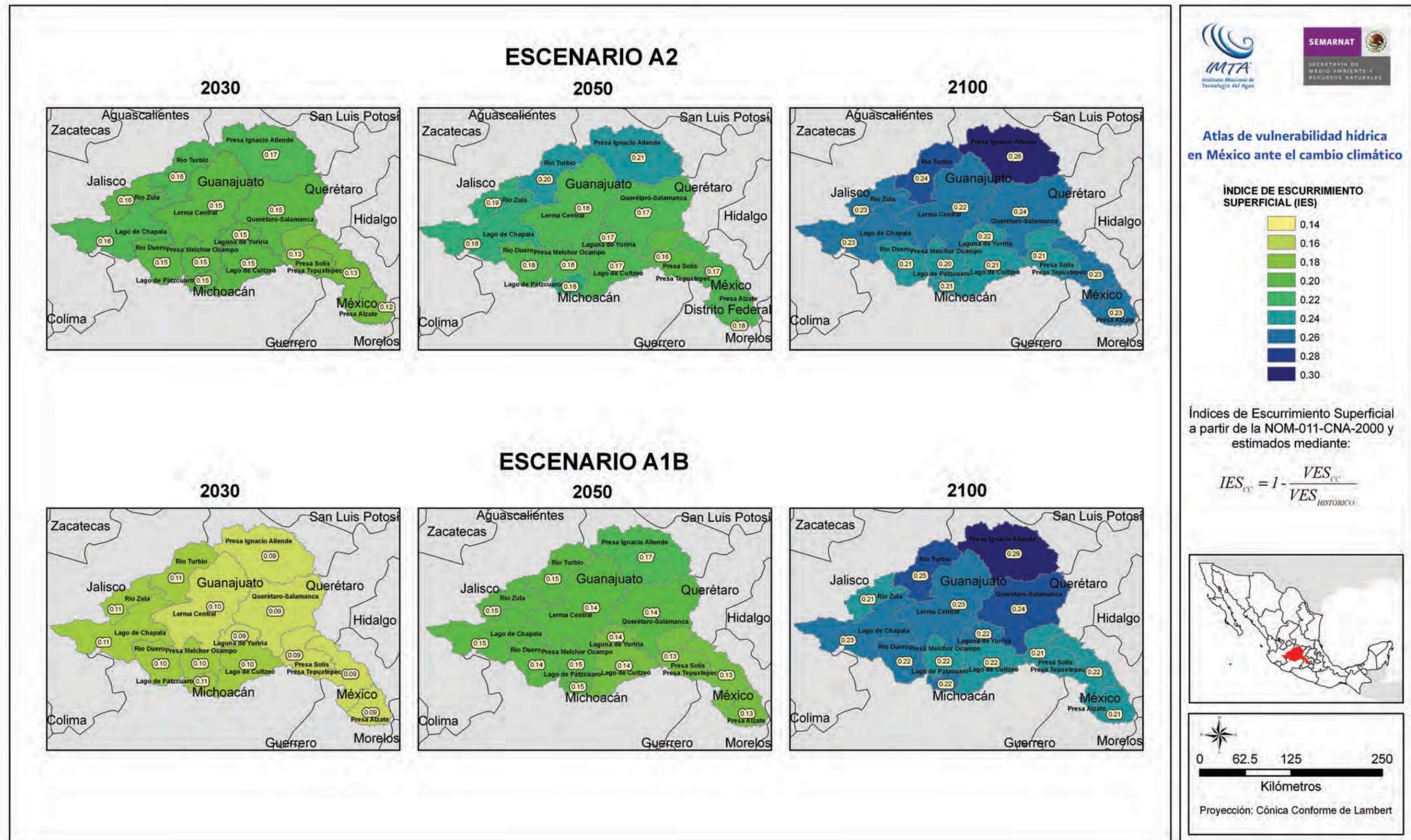
Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

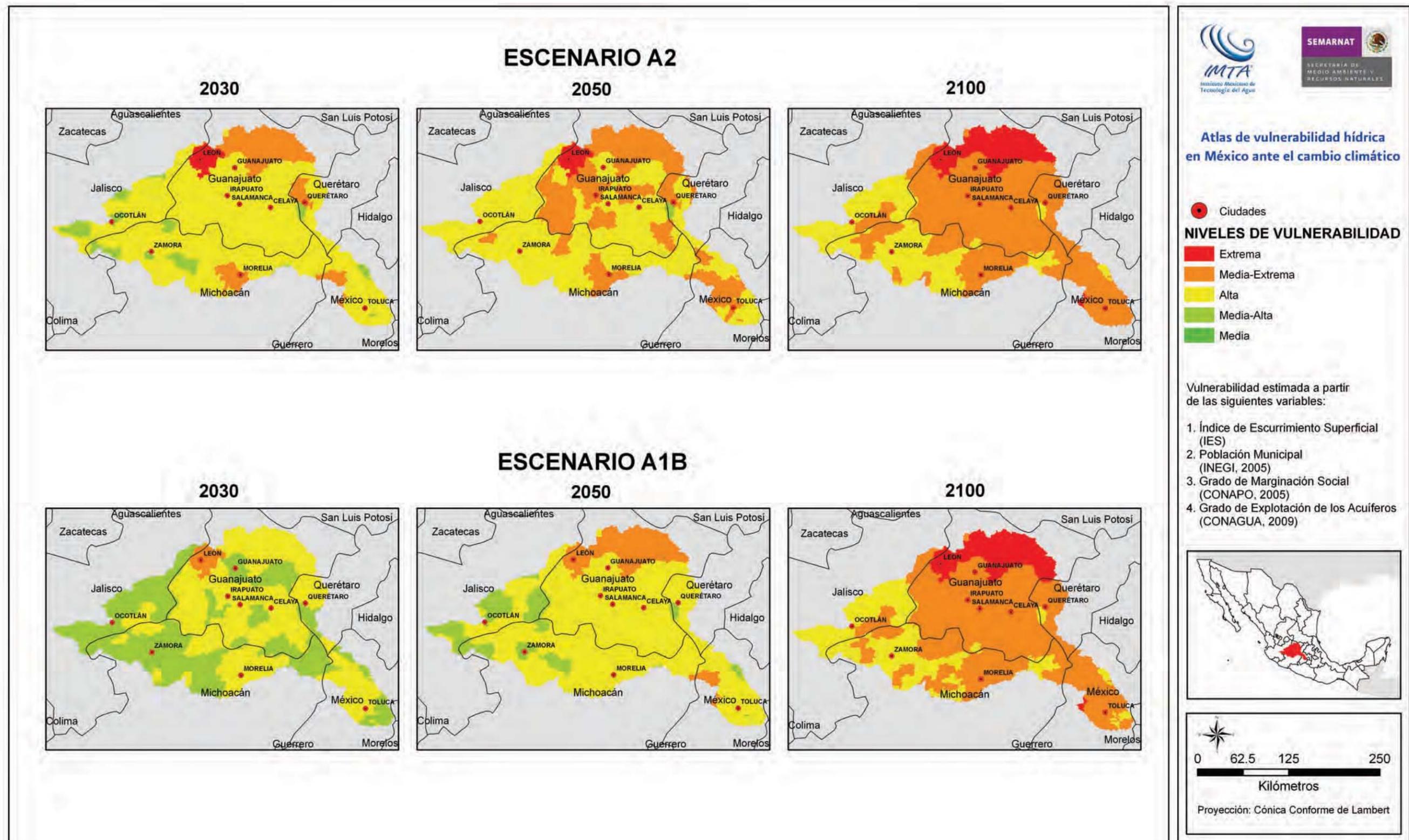
Índice de precipitación

Índices de Precipitación estimados mediante:

$$IP_{cc} = 1 - \frac{P_{cc}}{P_{HISTÓRICA}}$$

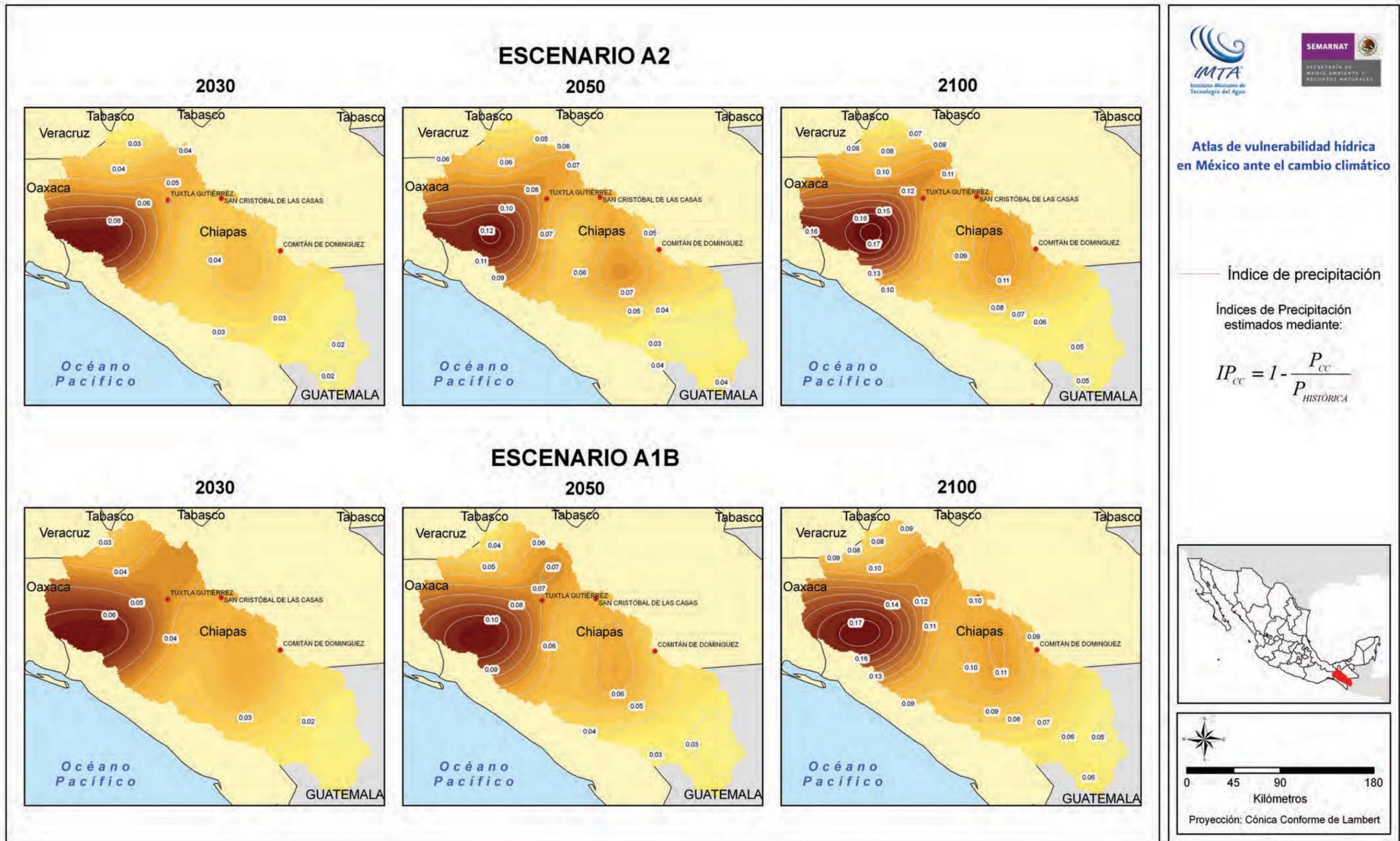


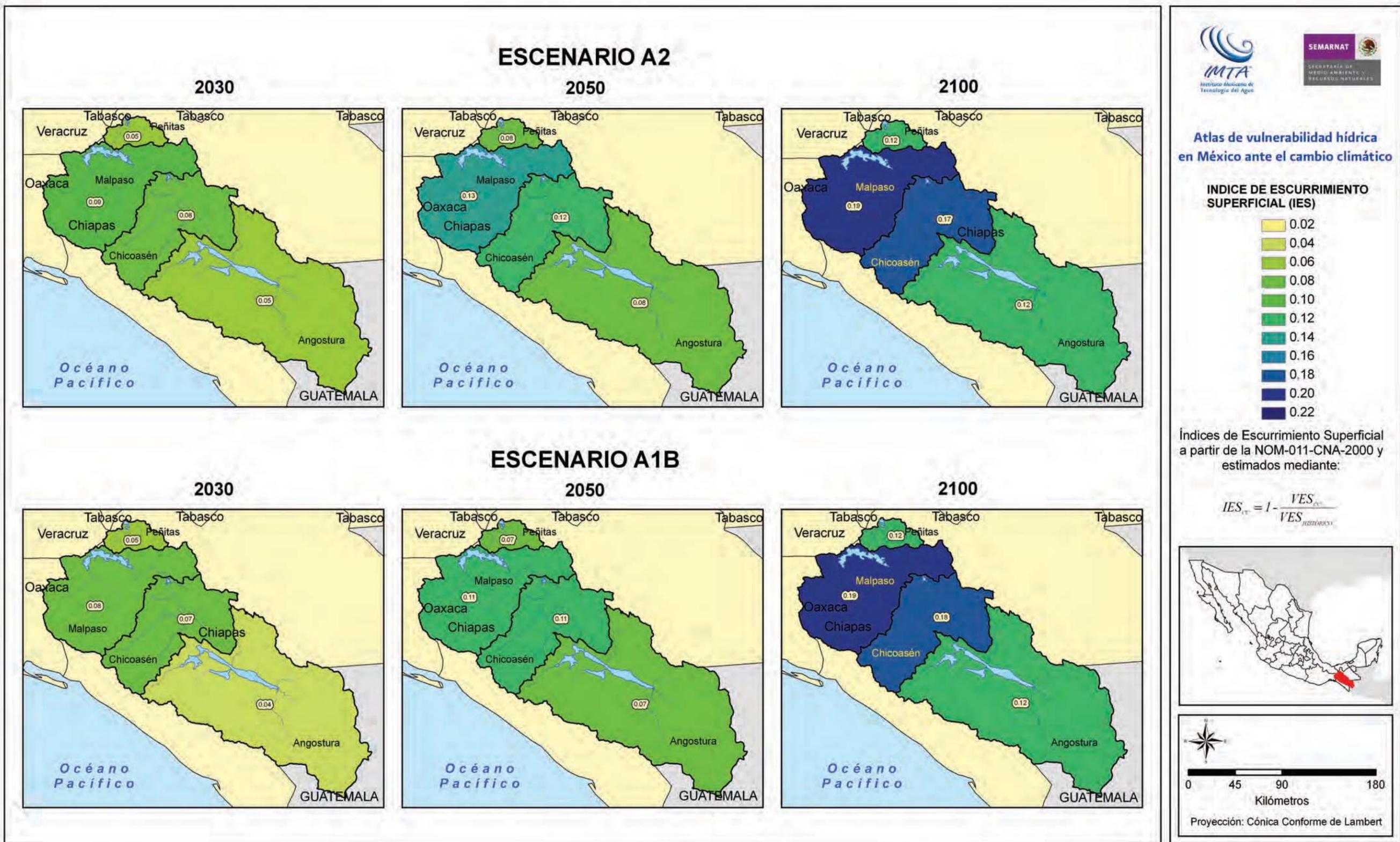


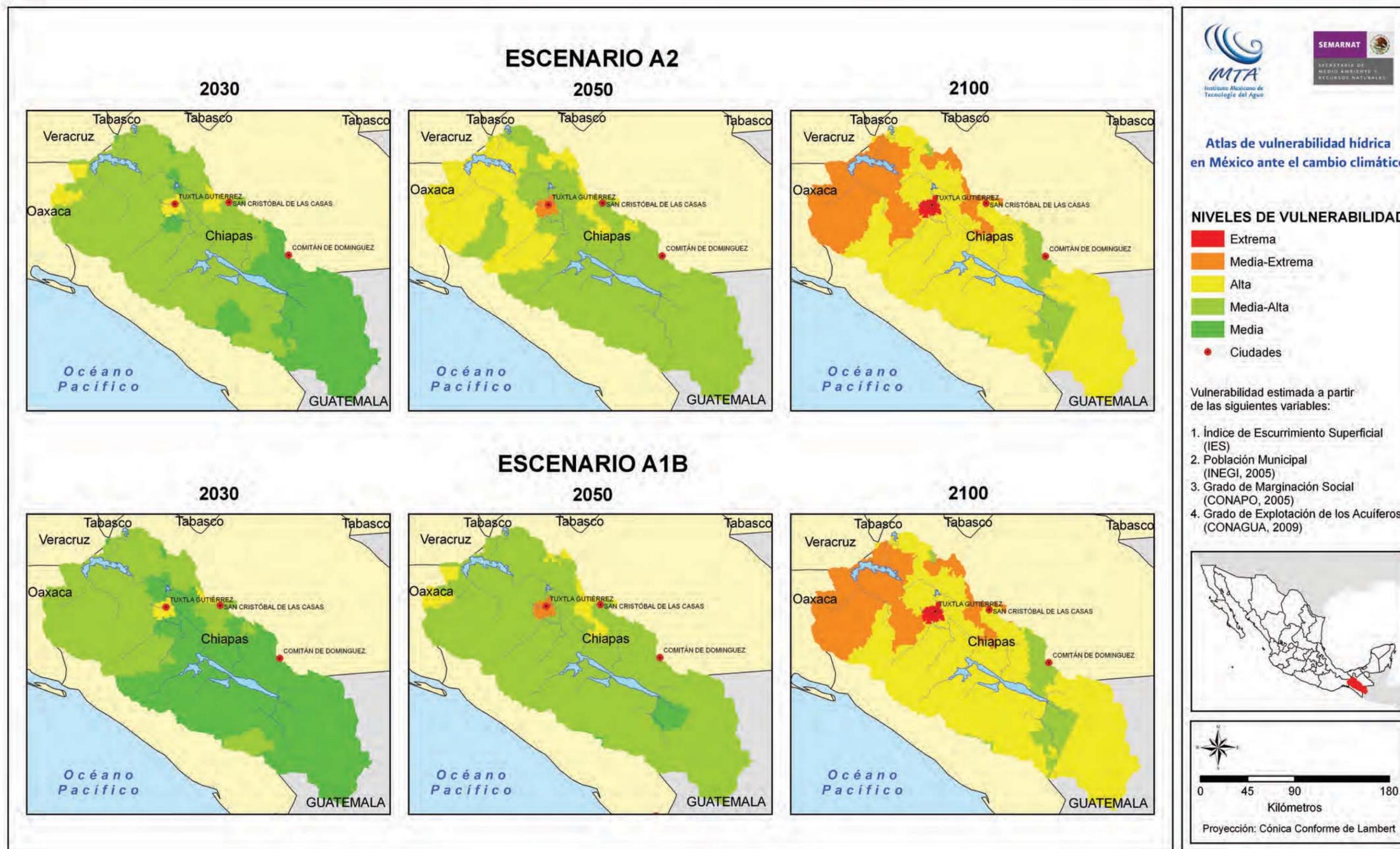












## Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación cuantificó los cambios del escurrimiento superficial debido a los efectos del cambio climático, evaluando los cambios que estiman los modelos de circulación general en precipitación pluvial. El enfoque totalmente práctico permitirá la evaluación del impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua dentro del territorio nacional, herramienta invaluable para establecer una adecuada planeación de los recursos hidráulicos. Este trabajo de investigación tiene por objeto identificar las regiones más vulnerables ante los efectos adversos del cambio climático.

Los mapas presentados pueden ser actualizados al considerar nueva información proporcionada por los modelos de circulación general y refinar los mapas usando suposiciones y escenarios adicionales. Mientras tanto, estos mapas permiten mediante el mapeo de la vulnerabilidad, identificar a los usuarios del agua más afectados y la ubicación geográfica donde los esfuerzos de adaptación ante el cambio climático son más necesarios.

Los resultados correspondientes al Horizonte de tiempo 2100 deben ser tomados con cierta reserva. Los modelos atmosféricos de circulación general mejoran continuamente, los avances tecnológicos en super-computo permiten incluir factores adicionales en la modelación numérica, además de que los modelos aumentan su resolución y por lo tanto su confiabilidad. Sin embargo, los resultados muestran tendencias claras en cuanto a los patrones anuales de precipitación, revelando que en las tres cuencas bajo estudio, el escurrimiento medio anual tenderá a disminuir.

El crecimiento demográfico natural no fue incluido en el presente análisis, sin embargo al disminuir los volúmenes de escurrimiento natural y aumentar la población, la disponibilidad hídrica por habitante tenderá a disminuir, lo cual generará una severa competencia entre los usuarios del agua, especialmente en la cuenca del río Conchos y en el norte de la cuenca Lerma-Chapala. Por ello, las técnicas del uso eficiente y reúso del agua resultan de una importancia trascendental con el propósito de mitigar los efectos del cambio climático.

Aunque los efectos del cambio climático generarán una disminución anual en la precipitación, se requerirá de estudios adicionales para evaluar el efecto del cambio climático en cuanto a eventos extremos de precipitación. Es decir, la

estimación de caudales de gran magnitud en las principales corrientes del país y la determinación de su correspondiente planicie de inundación permitirán identificar las zonas de riesgo.

## Referencias

- Adams, B. (2010). Super Decisions software. Creative Decisions Foundation. 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213, USA. <http://www.superdecisions.com/>
- Comisión Federal de Electricidad, CFE (2010). Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2010-2024 (POISE). Subdirección de Programación. Coordinación de Planificación. <http://www.cfe.gob.mx/>
- Comisión Nacional del Agua, CNA (1997). Programa Hidráulico de Gran Visión, Estado de Chihuahua (1996-2020). Subdirección General de Programación. Gerencia Regional Norte. Gerencia Estatal Chihuahua, México.
- Comisión Nacional del Agua, CNA (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua, CNA (2001). Programa Nacional Hidráulico 2001-2006. México.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2010). Geolocalizador de las Principales Presas de México. <http://siga.cna.gob.mx/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO (1988). "Uso de suelo y vegetación de INEGI agrupado por CONABIO". Escala 1:1'000,000. Modificado de: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) - Instituto Nacional de Ecología (INE), (1996). Uso del suelo y vegetación, escala 1:1'000,000. México.
- Consejo Nacional de Población, CONAPO (2005). Índices de marginación, 2005. Primera edición: Noviembre de 2006. México, D. F. <http://www.conapo.gob.mx> (Abril 30, 2010)
- Cotler, H., et al. (2006). Atlas de la Cuenca Lerma Chapala. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, D.F. <http://www.ine.gob.mx/>
- Hernández de la Torre, J. (2009). Plan Hidráulico de Tabasco. Segundo Seminario de Potamología. Villahermosa, Tabasco.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (2009). Subcoordinación de Hidrometeorología. Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México (SEDEPECC, v 1.0).
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI (2005). II Censo de Población y Vivienda 2005. México y sus municipios.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Summary for Policymakers. 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 (editors)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Jiménez, G. (2002). Uso agrícola del agua en la Cuenca del Río Conchos. Biodesert, A.C., Texas Center for Policy Studies. Chihuahua, Chihuahua.
- Jiménez y Maderey (2002). Escurrimiento medio anual, Hidrogeografía IV.6.4. Atlas Nacional de México. Vol. II, Escala 1:4'000,000. Instituto de Geografía, UNAM. México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Maderey, R. y Carrillo, R. (2005). El recurso de agua en México. Un análisis geográfico. Instituto de Geografía UNAM. México.
- Rocha, F. (2005). Programa de Manejo Integral de la Cuenca del Río Conchos. Grupo Interinstitucional de Trabajo (GIT). Chihuahua, México.
- Rubio y Triana (2006). Programa Asociado de Gestión de Crecientes. Caso de Estudio México: Río Grijalva. OMM – Organización Meteorológica Mundial.
- Saaty, T. (2001). The Analytic Network Process: Decision Making with Dependence and Feedback. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, SEMARNAP, Subsecretaría de Recursos Naturales (1998). "Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana". (Primera aproximación 1996). Escala 1:4'000,000. México. [http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/porquydonesomosvul/donesomosmasvul.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/porquydonesomosvul/donesomosmasvul.html) (Junio 21, 2010)
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2009). Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Diario Oficial de la Federación. Viernes 28 de agosto de 2009.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2009). Atlas del Agua en México, Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2010). Cambio Climático en México.

## Agradecimientos

A los especialistas en hidráulica del IMTA, M.I. Ernesto Aguilar Garduño, Ing. Jorge Humberto Salgado Rabadán, Dr. Waldo Ojeda Bustamante y Dr. Enrique A. Sánchez Camacho, así como, al M. en C. Alberto Balancán Soberanis, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su participación en el trabajo de coordinación general del documento. Al M. en C. Carlos Montaña de la Comisión Nacional del Agua por proporcionar datos en GIS de gran valor y oportunidad. La elaboración de este capítulo fue posible con el apoyo económico del Proyecto TH-1005.1 Vulnerabilidad Hídrica de México ante el Cambio Climático: Aguas Superficiales (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).





## **Capítulo 5. Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático**

*Waldo Ojeda Bustamante, Mauro Íñiguez Covarrubias  
y Juan Manuel González Camacho*





### Resumen

El riego es una práctica fundamental en la agricultura para asegurar una producción rentable en las zonas áridas y semiáridas del país. La variabilidad climática y los efectos potenciales del cambio climático, constituyen las principales amenazas de la agricultura de riego del presente siglo. En este contexto, resulta primordial caracterizar la vulnerabilidad de las zonas agrícolas de riego a los efectos potenciales del cambio climático. En este capítulo se muestran un conjunto de indicadores físicos, técnicos y socioeconómicos desarrollados para estimar la vulnerabilidad de las zonas de riego a nivel nacional para los ciclos agrícolas otoño-invierno y primavera-verano, con base en proyecciones regionalizadas de temperatura y precipitación para fines del presente siglo, según dos posibles escenarios de emisiones A1B y A2. Indicadores normalizados para la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático, fueron calculados espacialmente para generar mapas de vulnerabilidad a nivel nacional. En los mapas se muestran los resultados de la clasificación de las zonas agrícolas de riego en función del grado de vulnerabilidad. Éstos pueden servir como un instrumento de apoyo para definir políticas gubernamentales y elaborar planes de adaptación en regiones prioritarias del país. Los resultados indican que las zonas agrícolas más vulnerables son las zonas marginadas, con baja capacidad de adaptación y limitado desarrollo tecnológico y socioeconómico.

### Introducción

El cambio climático debido al incremento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero podría modificar los flujos térmicos y dinámicos de la atmósfera según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en Inglés, 2007). Los Modelos de Circulación General Atmosférica (MCGA) 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 (Montero y Pérez, 2008). El sector agrícola será afectado por estos cambios climáticos debido a su alta sensibilidad a cambios en los factores ambientales (Ojeda, *et al.*, 2008). 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.

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 sensibles al cambio climático. En este trabajo se presenta un análisis espacio-temporal de la vulnerabilidad al cambio climático de las zonas de riego de México, con base en indicadores biofísicos, técnicos y socioeconómicos.

### Panorama de la agricultura de riego en México

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

Para el período 1980-2007, la superficie total cosechada promedio fue de 18.6 millones de ha (figura 5.1), de las cuales, 27 % corresponden a la modalidad de riego y 73 % 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..

En el México prerevolucionario el desarrollo de las zonas de riego fue esencialmente de carácter privado. Posteriormente, la consolidación de los gobiernos federales al finalizar el período 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 período 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.

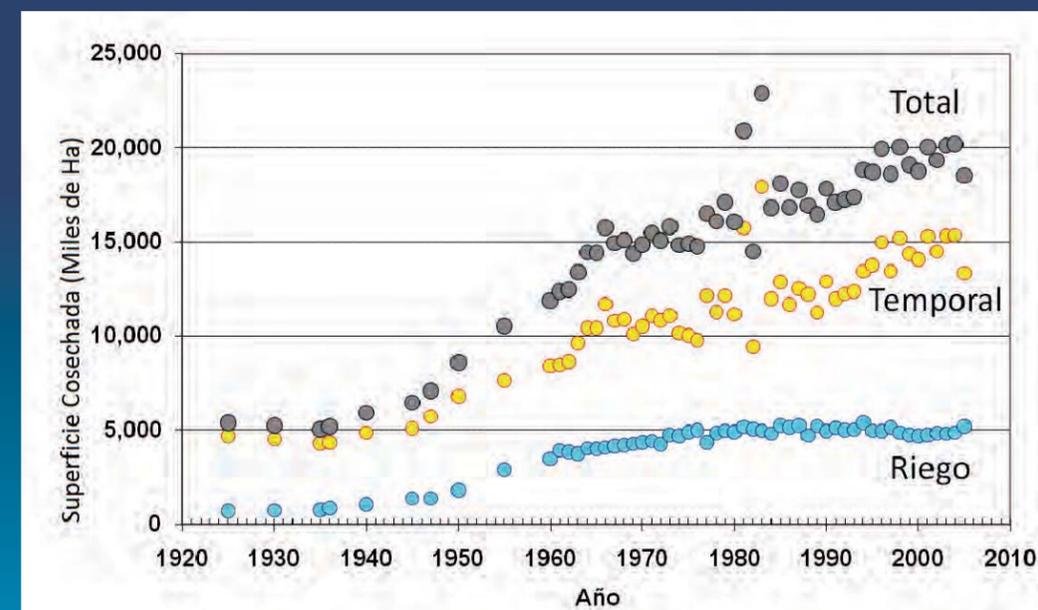


Figura 5.1. Evolución anual histórica de la superficie cosechada por modalidad (Elaboración propia con datos del SIAP, 2009; CONAGUA, 2009a).

Actualmente, México cuenta con 85 distritos de riego que cubren 54 % de la superficie de riego y 39 mil 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 ha (CONAGUA, 2010). Sin embargo, desde la década de los setentas, únicamente se cultivan en promedio 5 millones de ha (figura 5.1), que incluye segundos cultivos. El porcentaje promedio de segundos cultivos en los últimos 20 años es del orden de 11 % de la superficie física de riego anual cultivada, estimada en 4.4 millones de ha, que representa 68 % de la superficie agrícola con infraestructura de riego.

## Marco metodológico

En los sistemas de producción agrícola intervienen factores físicos, químicos y biológicos; así como factores socioeconómicos e institucionales. 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 5.2 se muestran los tres subsistemas que interactúan en un sistema de producción agrícola.

El término vulnerabilidad se aplica en las disciplinas naturales y sociales, y se define según la orientación y perspectiva del estudio; éste 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 fuerza a las cual el individuo o sistema es sensible.

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 o 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 como se indica en la figura 5.3.

La vulnerabilidad (V) de un sistema al cambio climático se expresa a través de los componentes (figura 5.3): los 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 a la ecuación 5.1, a mayor impacto mayor es la vulnerabilidad; mientras que, a mayor capacidad de adaptación menor es la vulnerabilidad.

## 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; el año agrícola comprende dos ciclos anuales, el ciclo otoño-invierno (OI) y el ciclo primavera-verano (PV). La caracterización de la vulnerabilidad de la agricultura de riego se realizó por ciclo agrícola; el ciclo OI cubre el período de octubre a marzo del siguiente año y el ciclo PV de abril a septiembre. Durante el ciclo OI la precipitación es baja en la mayor parte del país (mapa 5.2), por lo que la agricultura requiere de riego para suministrar los requerimientos hídricos de los cultivos. Para el caso de la temperatura, el ciclo OI, a diferencia del PV, presenta valores de temperatura cercanos al rango deseable para los cultivos (mapas 5.2 y 5.3) en regiones bajo agricultura de riego.

Los datos de las variables climáticas históricas y proyectadas corresponden para una malla regular de 50x50 km, mientras que las variables socioeconómicas y productivas se describen a nivel de municipios; de manera que, los 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 la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación). En forma adicional, se identifican también las relaciones funcionales entre los indicadores y la vulnerabilidad. Se identifican dos tipos de relaciones funcionales: relación directa o inversa del valor de indicador con la vulnerabilidad.

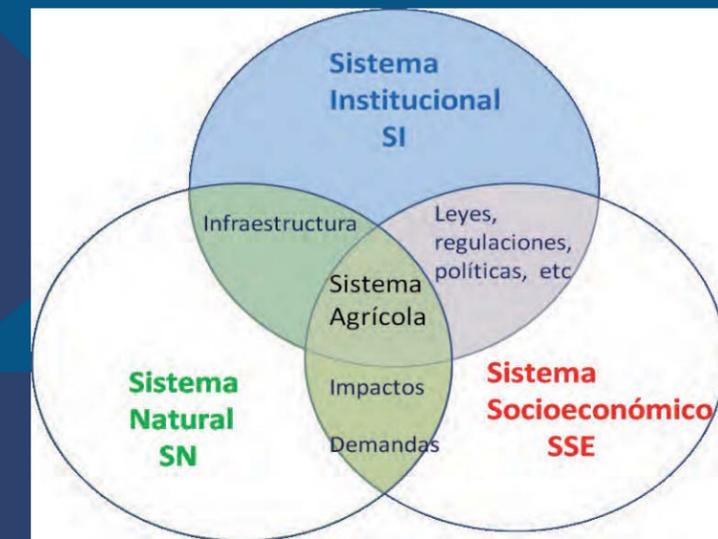
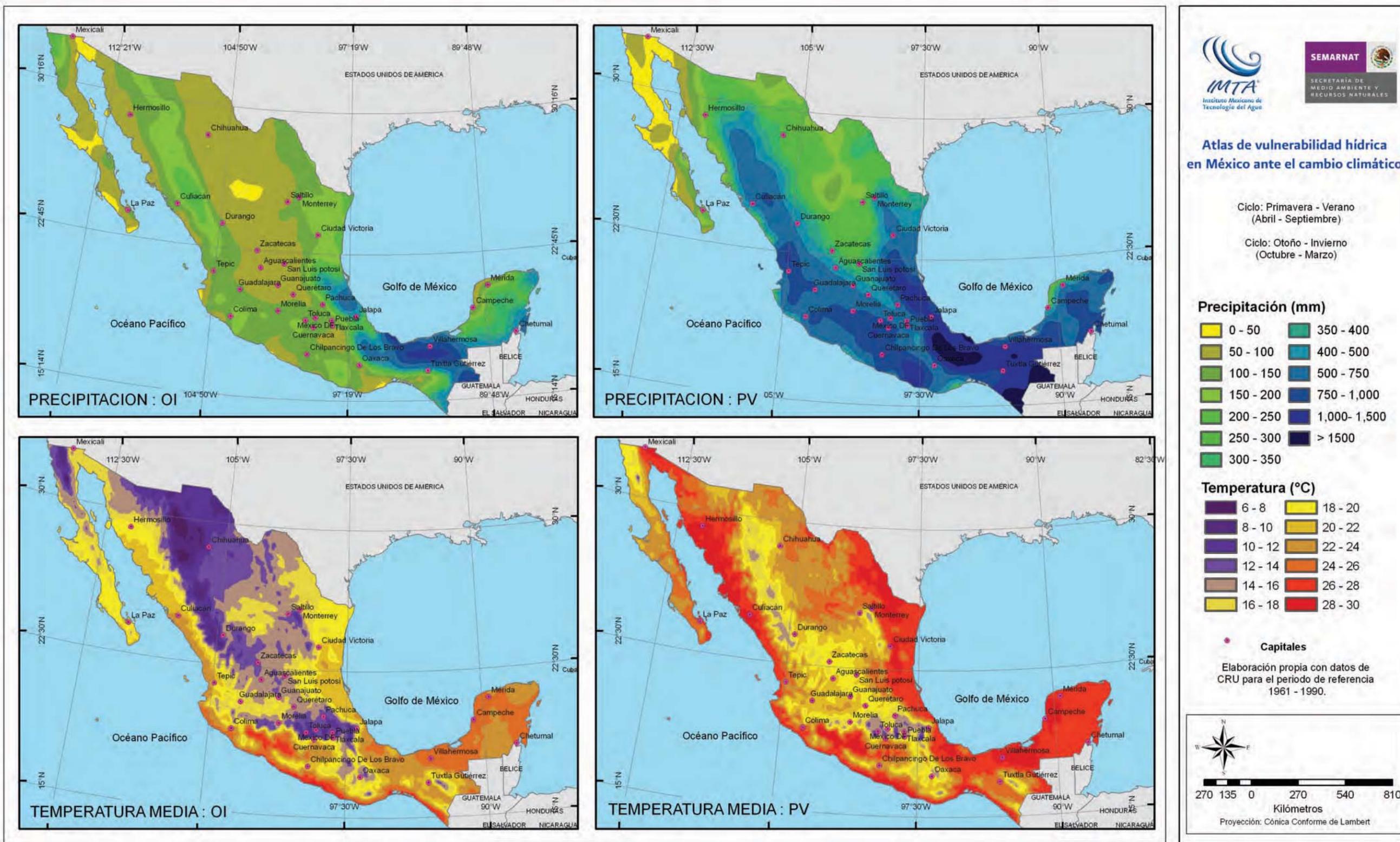


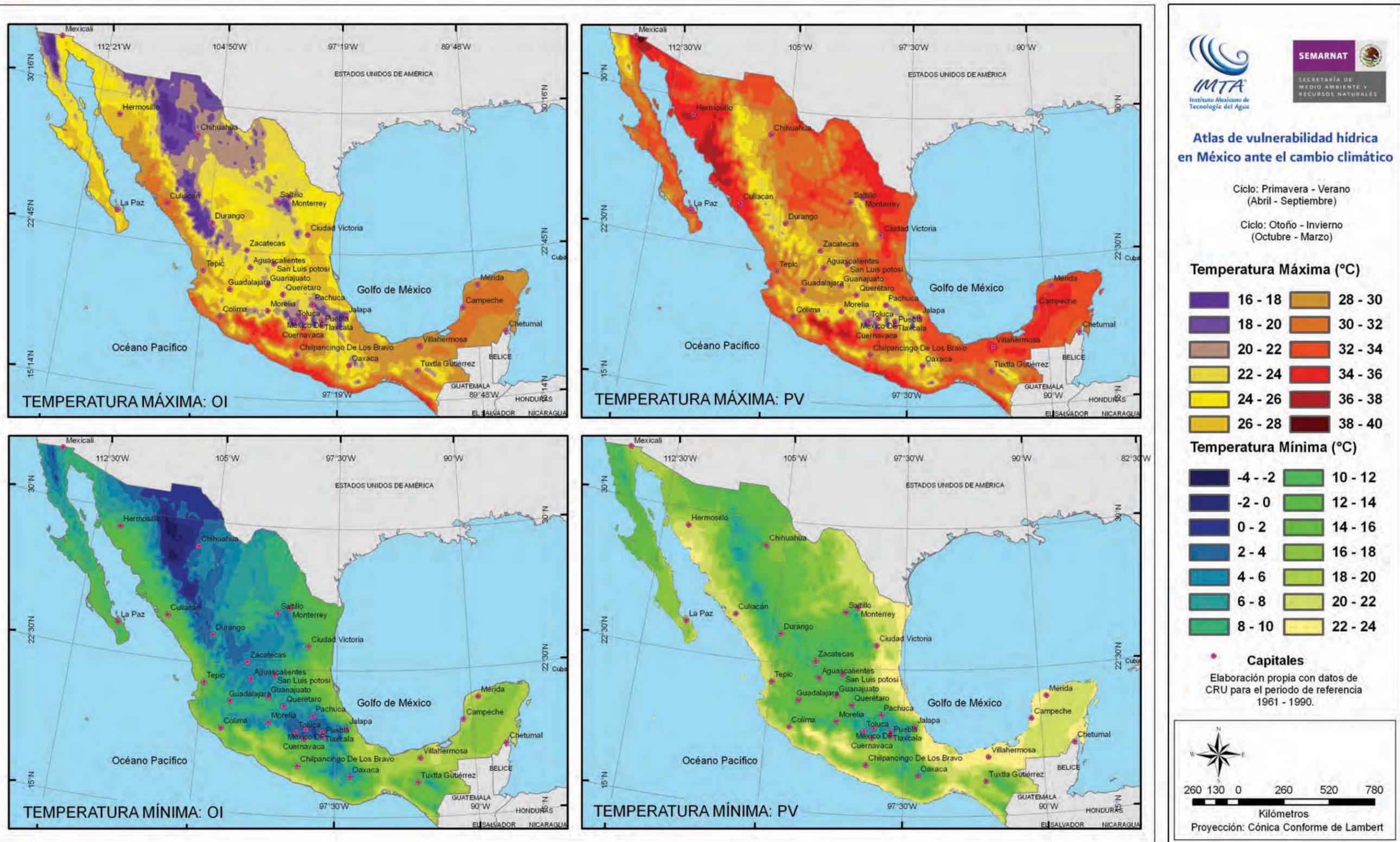
Figura 5.2. Interacciones en un sistema de producción agrícola (Loucks y van Beek, 2005).



Figura 5.3. Componentes para evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático (Gbetibouo, y Ringler, 2009).







## Exposición al cambio climático

En este estudio, para el período de análisis 2071-2098 con los escenarios A1B y A2, se utilizaron proyecciones mensuales promedio de la temperatura y la precipitación con una malla regular de 50x50 km, obtenida por técnicas estadísticas de reducción de escala a partir de proyecciones de modelos MCGA. La base de datos de precipitación y temperatura fue obtenida a través de promedios ponderados de las proyecciones de 23 MCGA disponibles en el centro de distribución de datos del IPCC ([www.ipcc-data.org](http://www.ipcc-data.org)) para los escenarios A1B y A2, de acuerdo a la metodología de confiabilidad de promedios de ensamble (Reliability Ensemble Averaging) aplicada por Montero y Pérez (2008).

El período de referencia considerado es de treinta años (1961-1990) y los valores históricos de las variables climáticas para México fueron extraídos de la base de datos TS3.0 de la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia de Inglaterra, conocida por CRU por sus iniciales en inglés (Climate Research Unit) que presenta series de datos mensuales en el período 1901-2006 a una resolución aproximada 50x50 km (Brohan, *et al.*, 2006; Jones, 1994.).

**Cuadro 5.1. Indicadores utilizados 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 de datos
Anomalía de la temperatura media diaria en el ciclo agrícola	$\Delta T_{med}$	Anomalía proyectada en °C en el ciclo agrícola para el período 2071-2098 con respecto al período base	$\Delta T_{med} \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	REA-IMTA (Montero y Pérez, 2008) Base de datos histórica de CRU (Brohan, <i>et al.</i> , 2006)
Anomalía de la temperatura máxima diaria en el ciclo agrícola	$\Delta T_{max}$	Anomalía proyectada en °C en el ciclo agrícola para el período 2071-2098 con respecto al período base	$\Delta T_{max} \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Anomalía de la precipitación acumulada en el ciclo agrícola	$\Delta Precip$	Cambio proyectado en % del decremento de la precipitación acumulada en el ciclo agrícola para el período 2071-2098 con respecto al base	$\Delta Precip \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Probabilidad de sequías	$\Delta sequia$	Anomalía proyectada del índice estandarizado de precipitación (SPI6) para seis meses para los ciclos OI (marzo) y PV (septiembre) para el período 2071-2098 con respecto al período base	$\Delta Sequia \uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	
Frecuencia de ciclones	Ciclones	Probabilidad de ocurrencia de ciclones de 1960-2006	Ciclones $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	Peduzzi, Dao and Herold (2005)
Nivel mar 5m	Mar	Área inundable asumiendo un incremento del nivel de mar de 5 m	NMar $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	CRISIS, 2010. University of Kansas, USA

En el cuadro 5.1 se resumen los indicadores aplicados para estimar el grado de exposición al cambio climático, los primeros cuatro indicadores son las anomalías de las variables climáticas del período 2071-2098 con respecto al período base 1961-1990. Los dos últimos indicadores definen el impacto potencial de la frecuencia de ciclones y el área inundable por incremento del nivel del mar.

## 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 para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático.

En el cuadro 5.2 se incluye el índice de diversificación de cultivos ( $I_d$ ) que está 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 ha;  $A_t$  es el área total cosechada en la zona agrícola de interés en ha; y  $N_c$  es el número total del cultivos reportados.

**Cuadro 5.2. Indicadores utilizados 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 de datos
Diversidad de cultivos	Diversa	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	Diversa $\uparrow \Rightarrow Vul \downarrow$	SIAP, 2009
Tamaño parcela	Sup	Superficie de la parcela media de riego	Sup $\uparrow \Rightarrow Vul \downarrow$	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Población rural	Rural	% población con menos de 5000 hab	Sup $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	Conapo (2005)
Uso de fertilizantes	Fertiliza	Uso de fertilizantes	Fertiliza $\uparrow \Rightarrow Vul \downarrow$	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Variabilidad en la precipitación	Precip	Desviación estándar de la precipitación anual acumulada período base (1961-1990)	Desv $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	Base de datos histórica de CRU (Brohan, <i>et al.</i> , 2006)
Variabilidad en el rendimiento	Rend	Rendimiento máximo del maíz de riego a nivel municipal para los años agrícolas 2002-2008	Rend $\uparrow \Rightarrow Vul \downarrow$	SIAP, 2009
Evapotranspiración	ET <sub>o</sub>	Evapotranspiración anual de referencia acumulada	ET <sub>o</sub> $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	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 $\uparrow \Rightarrow Vul \uparrow$	Inegi (1998) Conagua (2009b)

Un posible indicador de sensibilidad podría ser la variabilidad histórica en la disponibilidad de agua de las zonas de riego, que no fue incluido en este estudio por falta de datos a nivel nacional. Conviene anotar que no fue considerado también el efecto en la disponibilidad de agua de las zonas de riego que forman parte de cuencas binacionales compartidas entre México y E.E.U.U. de los ríos Bravo y Colorado y 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 a nivel 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 nulificarse 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 e incrementado no solo sus niveles de marginación y baja rentabilidad; sino también la degradación de sus recursos naturales. El carácter multifuncional de la agricultura ha sido reconocida por la 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 agrícolas del país.

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

Indicador	Clave	Descripción	Relación del indicador con la vulnerabilidad	Fuente de datos
Marginación	Margina	Grado de marginación	Margina ↑ => Vul ↑	Conapo (2005)
Analfabetismo	Analf	% población analfabeta mayor de 15 años	Analf ↑ => Vul ↑	Conapo (2005)
Cobertura de servicios	Servicios	% cobertura servicios en domicilios de productor (agua potable, drenaje y electricidad)	Servicios ↑ => Vul ↓	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Dependientes	Depend	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 de repetición de cultivos promedio en los años agrícolas 2002-2008 solo incluye agricultura de riego	IUT ↑ => Vul ↓	SIAP, 2009
Mecanización agrícola	Mecánica	Porcentaje de agricultores que usan mecanización agrícola	Mecánica ↑ => Vul ↓	Censo Agropecuario 2007 (INEGI, 2009)
Cobertura de crédito/seguro	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 del sistema y que secontaba 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 facilitar su comparación (Vincent 2004) mediante la siguiente expresión:

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

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

Los indicadores normalizados de la componente exposición (E) se presentan en los mapas 5.4 al 5.8. Los indicadores normalizados de la componente sensibilidad (S) se presentan en los mapas 5.10 y 5.11. Mientras que los indicadores normalizados de la componente capacidad de adaptación (CA) se presentan en los mapas 5.14 y 5.15.

- 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 100; esto es, de menor a mayor vulnerabilidad. Un valor de 100 indica la mayor vulnerabilidad.

Los pesos ( $P_j$ ) fueron estimados con el método propuesto por Iyengar y Sudarshan (1982) con la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{c}{1/\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}} \quad (5.5)$$

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.

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

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

Los pesos estimados de las variables seleccionadas para estimar la exposición al cambio climático se presentan en el cuadro 5.4; para estimar la sensibilidad en el cuadro 5.5; y para estimar el componente de capacidad de adaptación en el cuadro 5.6.

**Cuadro 5.4. Pesos estimados ( $P_i$ ) de los indicadores utilizados (cuadro 5.1) para estimar la exposición al cambio climático, escenarios A1B y A2 y ciclos agrícolas OI y PV.**

Indicador	A1B		A2	
	OI	PV	OI	PV
$\Delta T_{med}$	0.136	0.149	0.124	0.149
$\Delta T_{max}$	0.122	0.140	0.112	0.144
$\Delta Precip$	0.135	0.137	0.188	0.139
$\Delta sequía$	0.203	0.157	0.199	0.145
Ciclones	0.201	0.208	0.188	0.211
Mar	0.202	0.209	0.189	0.212
Suma	1.0	1.0	1.0	1.0

Por ejemplo para calcular la componente E, usando los indicadores del cuadro 5.1 y los respectivos pesos del cuadro 5.4 para el escenario A1B y el ciclo OI, se obtiene la ecuación 5.7 para estimar la componente E de la vulnerabilidad a partir de la ecuación 5.4.

$$E = 0.136 \Delta T_{med} + 0.122 \Delta T_{max} + 0.135 \Delta Precip + 0.203 \Delta sequía + 0.201 \text{ ciclones} + 0.202 \text{ Mar} \quad (5.7)$$

**Cuadro 5.5. Pesos estimados ( $P_i$ ) de los indicadores usados (cuadro 5.2) para estimar la sensibilidad al cambio climático.**

Indicador	Diversa	Sup	Rural	Fertiliza	Precip	Rend	ETo	Degrada	Diversa	Suma
Peso	0.122	0.145	0.133	0.176	0.051	0.115	0.060	0.062	0.134	1.0

**Cuadro 5.6. Pesos estimados ( $P_i$ ) de los indicadores usados (cuadro 5.3) para estimar la capacidad de adaptación al cambio climático.**

Indicador	Margina	Analf	Servicios	Depende	Tiempo	Agrícola	IUT	Mecánica	Suma
Peso	0.078	0.144	0.070	0.085	0.145	0.210	0.169	0.097	1.0

4) La vulnerabilidad global  $V$  es estimada con la ecuación (5.8) que asume un peso  $P_i$  de  $\frac{1}{3}$  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.

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

5) Generación del mapa global de vulnerabilidad ( $V$ ) para la zona de estudio de acuerdo al cálculo espacial dada 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 una unidad de estudio. Se asume que las regiones con mayores cambios climáticos previstos tendrán más problemas para adaptarse. Para estimar el grado de exposición se generaron cuatro mapas de exposición climática con seis indicadores cada uno (cuadro 5.1).

Se estimaron las anomalías de las variables climáticas:  $\Delta T_{med}$ ,  $\Delta T_{max}$ ,  $\Delta Precip$  y  $\Delta sequía$ , y se normalizaron de acuerdo a la ecuación 5.3. Estas anomalías normalizadas para el ciclo OI se presentan en los mapas 5.4 y 5.5 para los escenarios A1B y A2, respectivamente. Para el ciclo PV, se elaboraron los mapas 5.6 y 5.7 para los escenarios A1B y A2, respectivamente. Para el caso de los indicadores de ciclones y nivel del mar se elaboró el mapa 5.8.

Se observa que las anomalías de precipitación para el ciclo OI resultan más contrastantes que las correspondientes para el ciclo PV (comparando mapas de precipitación 5.4 y 5.5 con 5.6 y 5.7). 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 muestra alta vulnerabilidad a anomalías en la precipitación para ambos ciclos agrícolas y ambos escenarios A1B y A2. La región norte centro presenta alta vulnerabilidad a cambios en la precipitación durante el ciclo OI pero para el ciclo PV su vulnerabilidad es baja.

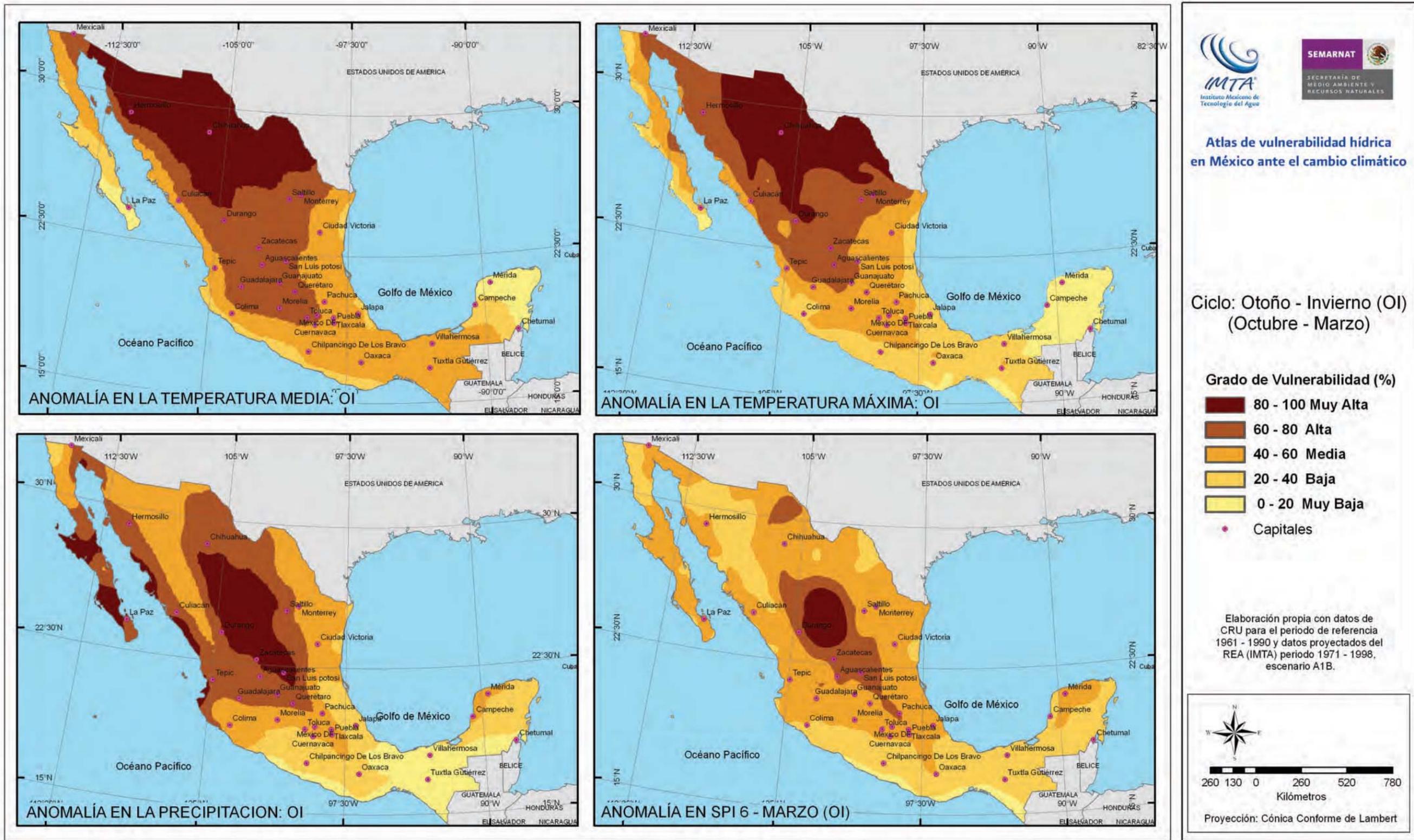
Las mayores anomalías en las temperaturas (media y máxima), y en consecuencia mayor vulnerabilidad, se presentan para ambos ciclos en los estados del norte del país que colindan con los Estados Unidos como se muestra en los mapas 5.4-5.7. Se presenta una superficie con mayor vulnerabilidad por exposición a altas temperaturas en el ciclo PV que para el ciclo otoño-invierno.

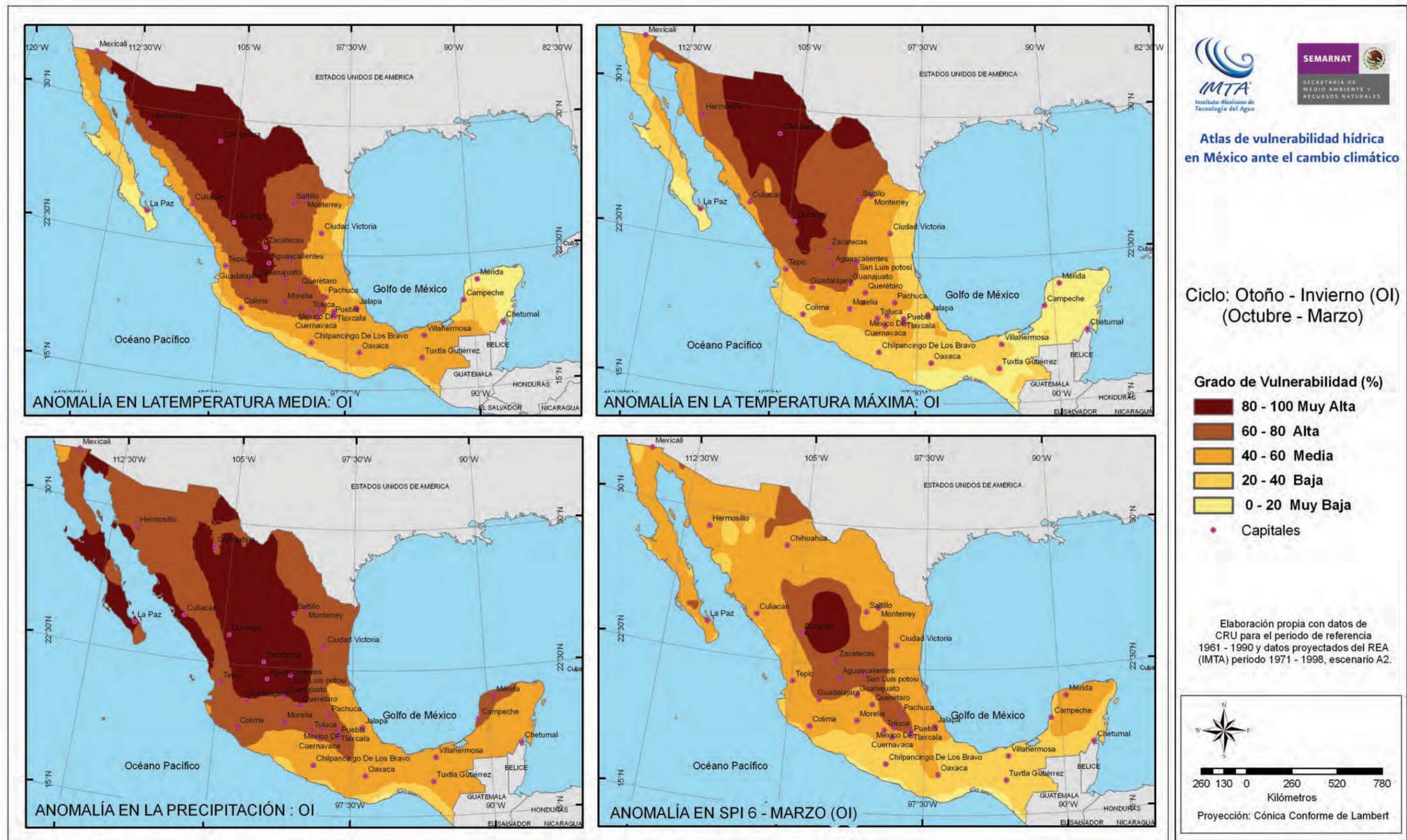
El cambio climático puede incrementar la intensidad de los eventos ciclónicos que impactan los estados costeros del país. En consecuencia las zonas agrícolas cercanas al mar presentan la mayor vulnerabilidad por exposición a eventos ciclónicos, principalmente las localizadas en el norte de Tamaulipas, la península de Yucatán, y el sur de la península de Baja California (mapa 5.8). Otro de las repercusiones del cambio climático es el ascenso del nivel del mar, el mapa 5.8 muestra la alta vulnerabilidad de algunas zonas costeras del país por incremento potencial en el nivel del mar.

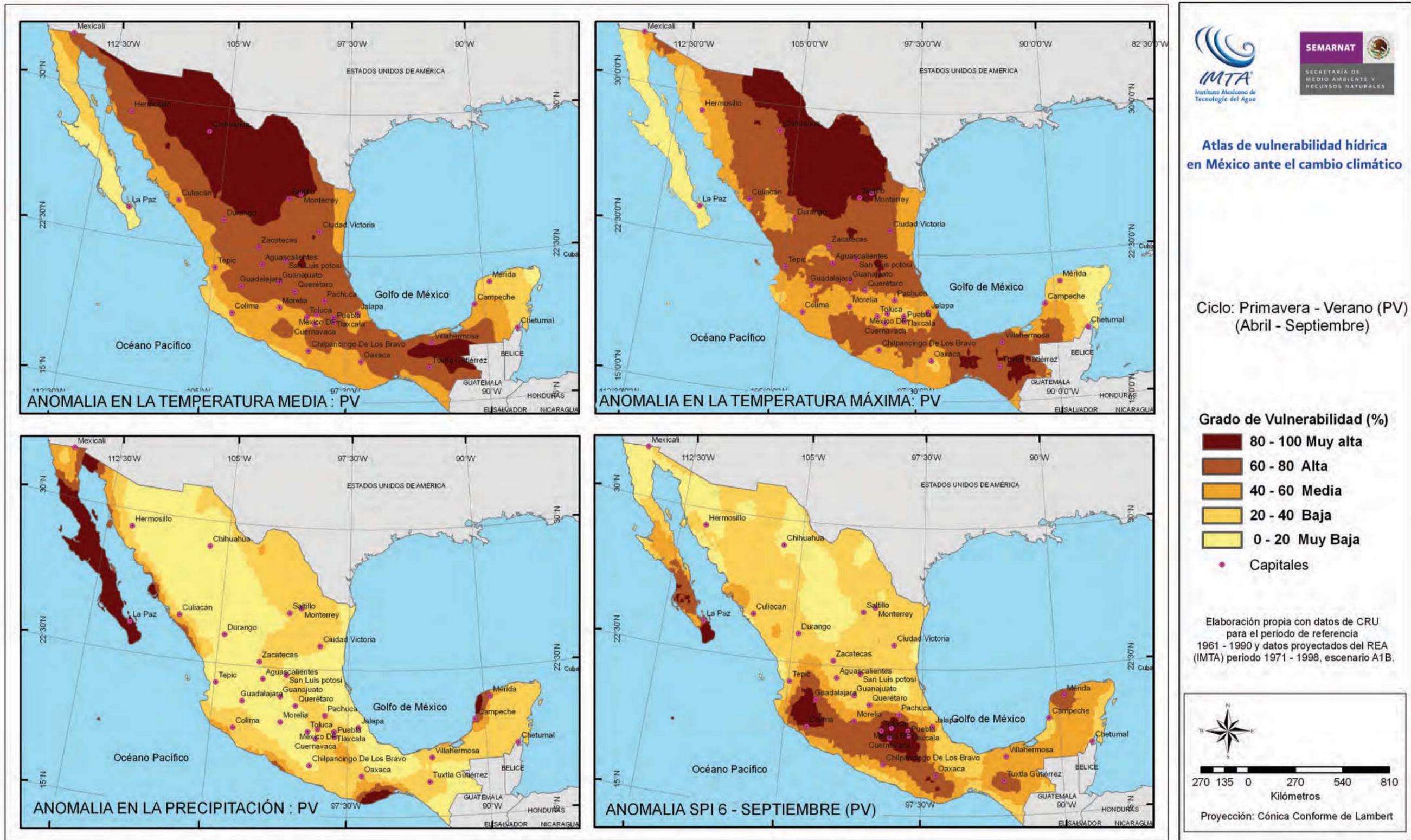
Se generaron cuatro mapas de exposición al cambio climático (mapa 5.9), para los dos ciclos agrícolas con dos escenarios de emisiones. Se observa un incremento en superficie total para las zonas de alta vulnerabilidad para el ciclo OI con respecto al ciclo PV, y en el escenario A2 con respecto al A1B. El norte del país y varias zonas costeras del país muestran alta vulnerabilidad por exposición al cambio climático para el ciclo OI. Las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad son menores en el ciclo PV que para el ciclo otoño-invierno.

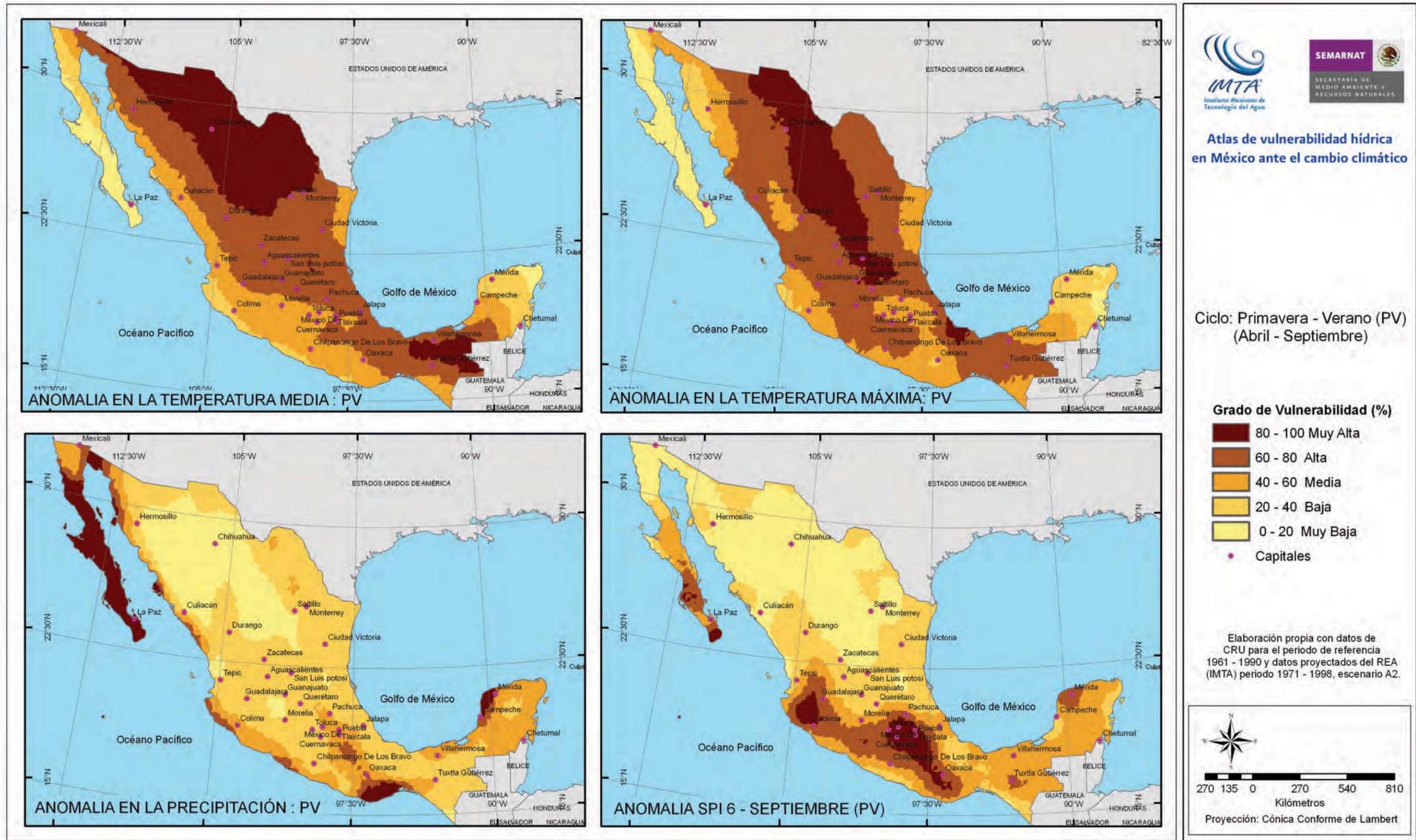
## Mapa de sensibilidad al cambio climático

En el mapa 5.10 se presentan los indicadores de sensibilidad normalizados: Diversidad de cultivos, Tamaño parcela, Población rural, y Uso de fertilizantes. En el mapa 5.11 se presenta la segunda parte complementaria de los indicadores de sensibilidad normalizados: Variabilidad en la precipitación, Variabilidad en el rendimiento, Evapotranspiración y Degradación de suelos y acuíferos.











Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Zonas de Riego

Zonas de Riego

Índice de nivel del mar

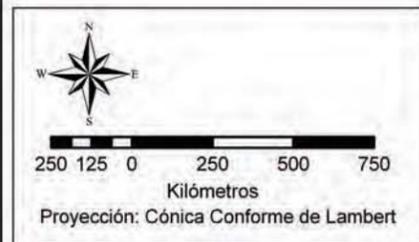
Zona inundable

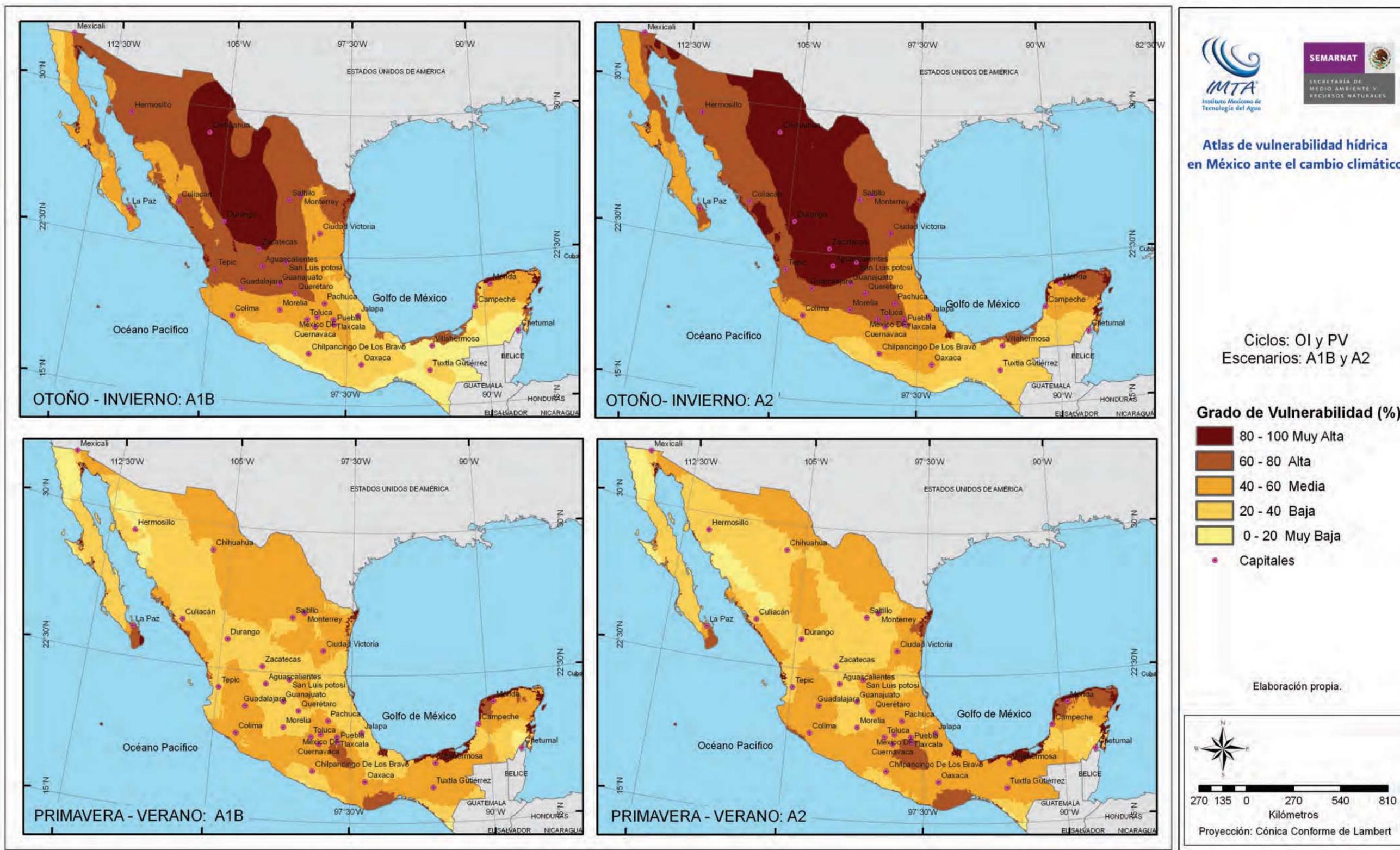
Grado de vulnerabilidad por ciclones (%)

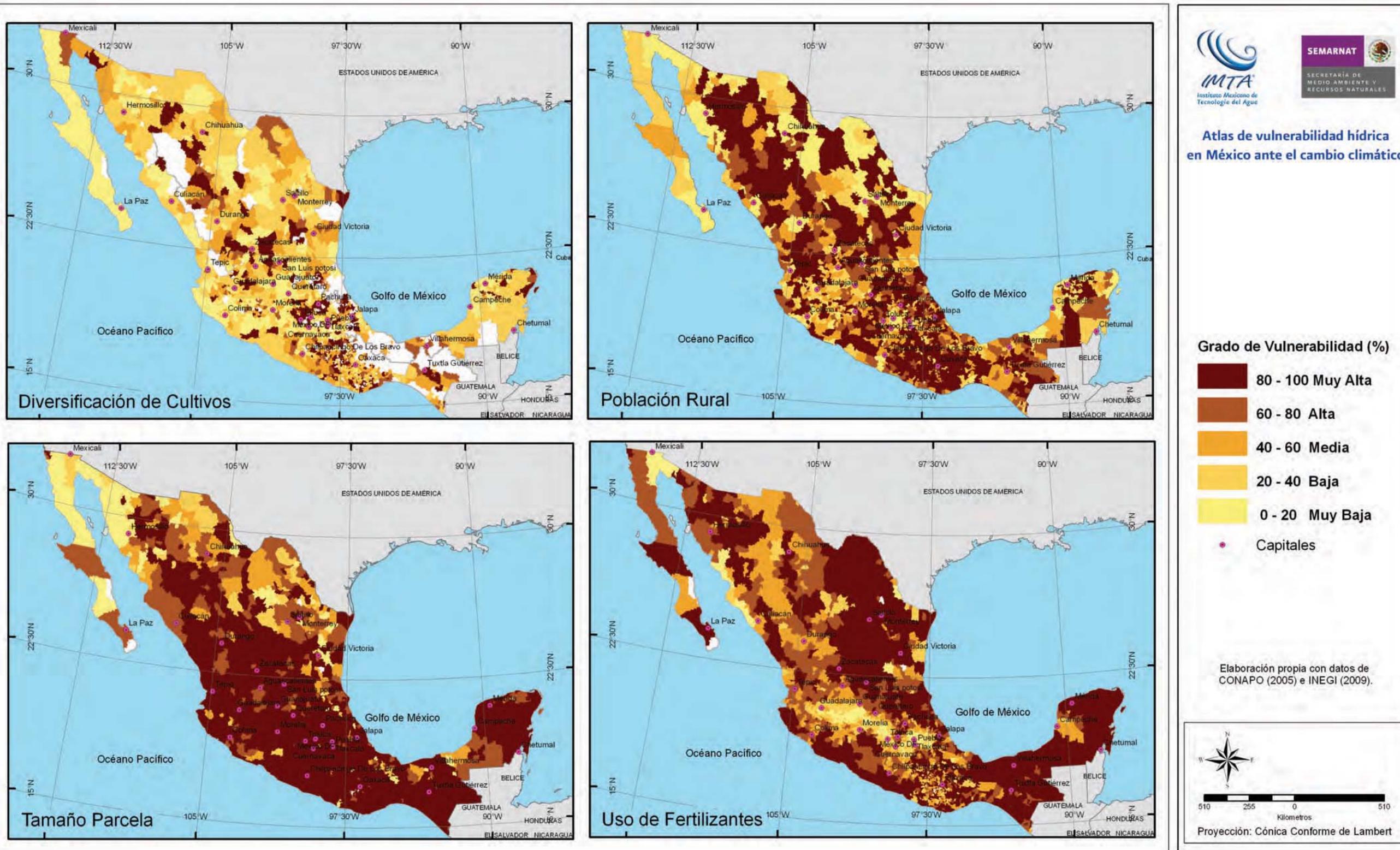
- 80 - 100 Muy Alto
- 60 - 80 Alto
- 40 - 60 Medio
- 20 - 40 Bajo
- 0 - 20 Muy Bajo

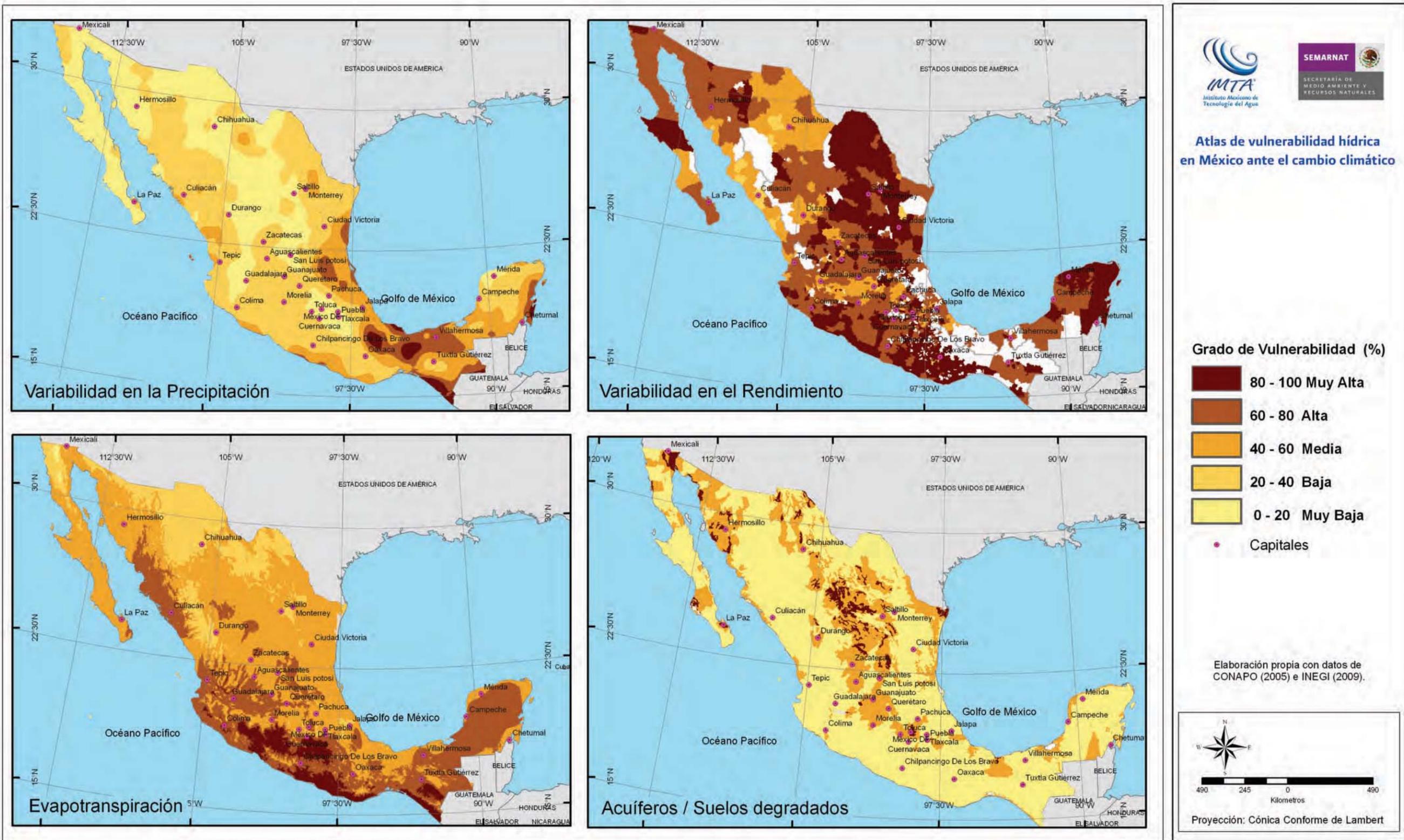
Capitales

Elaboración propia con datos de CRESIS (2010) para el nivel del mar y Peduzzi, et. al. (2005) para frecuencia de ciclones.









Los mapas de los indicadores de sensibilidad muestran una alta variabilidad en donde se practica la agricultura (mapas 5.10 y 5.11). Existe una superficie importante localizada principalmente en las zonas áridas y semiáridas del país con alta vulnerabilidad debido a la degradación del suelo y acuíferos (mapa 5.11). Se generó un mapa de sensibilidad actual al cambio climático (mapa 5.12) que integra los nueve indicadores del cuadro 5.2. Varios municipios de los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas muestran alta vulnerabilidad por sensibilidad al cambio climático.

### Mapa de capacidad de adaptación al cambio climático

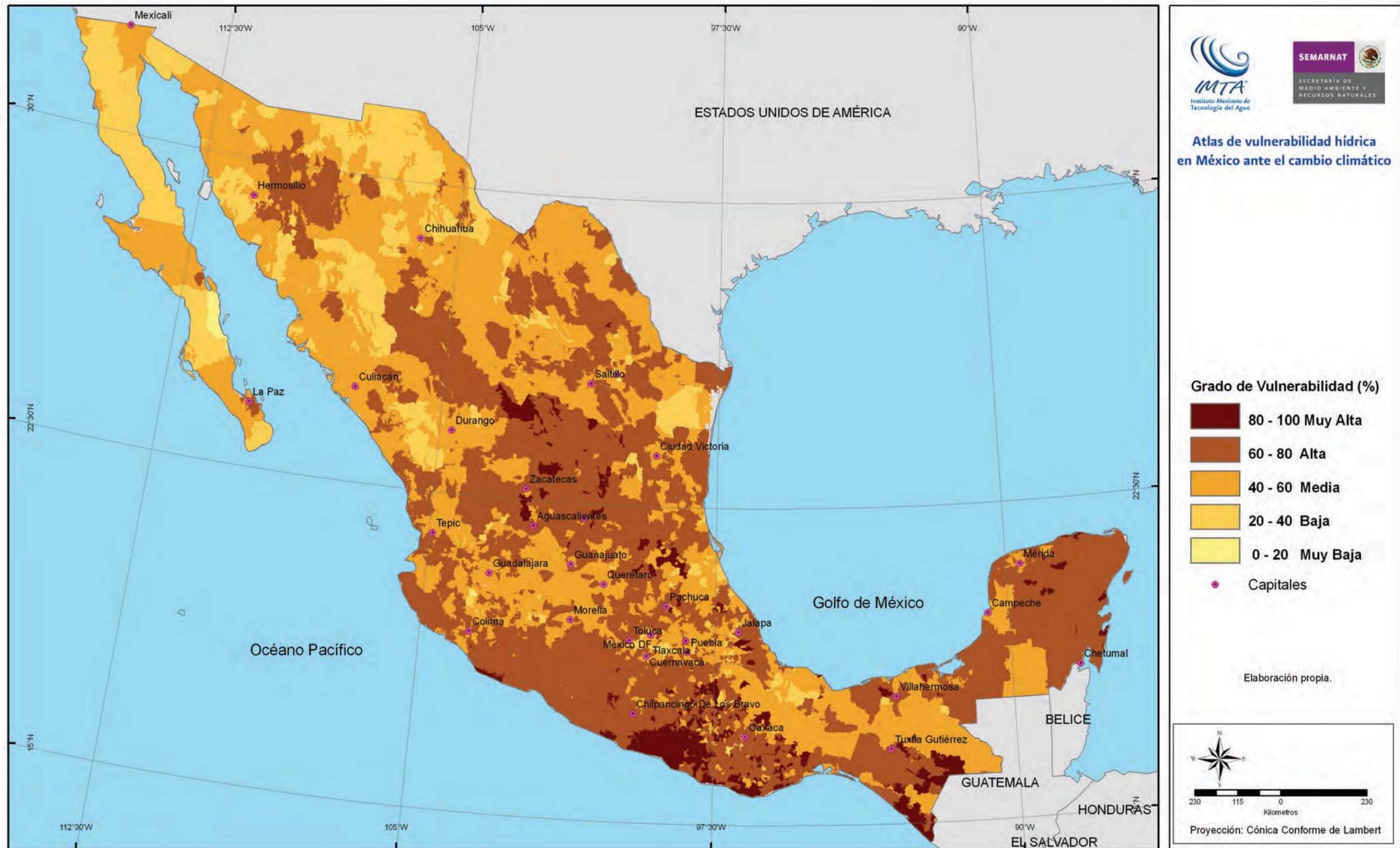
En el mapa 5.13 se presentan los indicadores de sensibilidad normalizados: Marginación, Analfabetismo, Cobertura de servicios, Dependientes económicos

y Acceso a centros urbanos. En el mapa 5.14 se presenta la segunda parte de los indicadores de sensibilidad normalizados: Ingreso agrícola, Intensidad en el uso de la tierra, Mecanización agrícola y Cobertura de crédito/seguro. Los indicadores de capacidad de adaptación indican que a mayor capacidad de adaptación menor es su vulnerabilidad.

Se usaron 8 indicadores para evaluar la capacidad de adaptación al cambio climático. La variación espacial de los indicadores de capacidad de adaptación se presenta en los mapas 5.13 y 5.14. El mapa 5.15 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. Las zonas de alta vulnerabilidad por capacidad de adaptación (sur y sureste del país) no necesariamente son las zonas de alta vulnerabilidad por exposición al cambio climático.

### Mapas de vulnerabilidad de la agricultura de riego

Los mapas 5.16 al 5.19 muestran la vulnerabilidad espacial al cambio climático de la agricultura de riego para los ciclos agrícolas OI y PV bajo los escenarios A1B y A2. Se observa que la capacidad de adaptación define los patrones de vulnerabilidad en regiones de alta marginación como fue reportado por Yusuf y Francisco (2009). Varias regiones del país, localizadas en las 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 la regiones norte centro, sur y península de Yucatán (mapas 5.16 y 5.17). Mientras que para el ciclo PV, estas zonas se concentran en el sur, sureste y península de Yucatán.





Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

Grado de Vulnerabilidad (%)

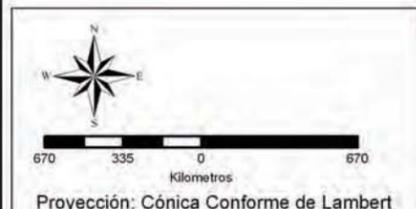
- 80 - 100 Muy alta
- 60 - 80 Alta
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Baja
- 0 - 20 Muy baja

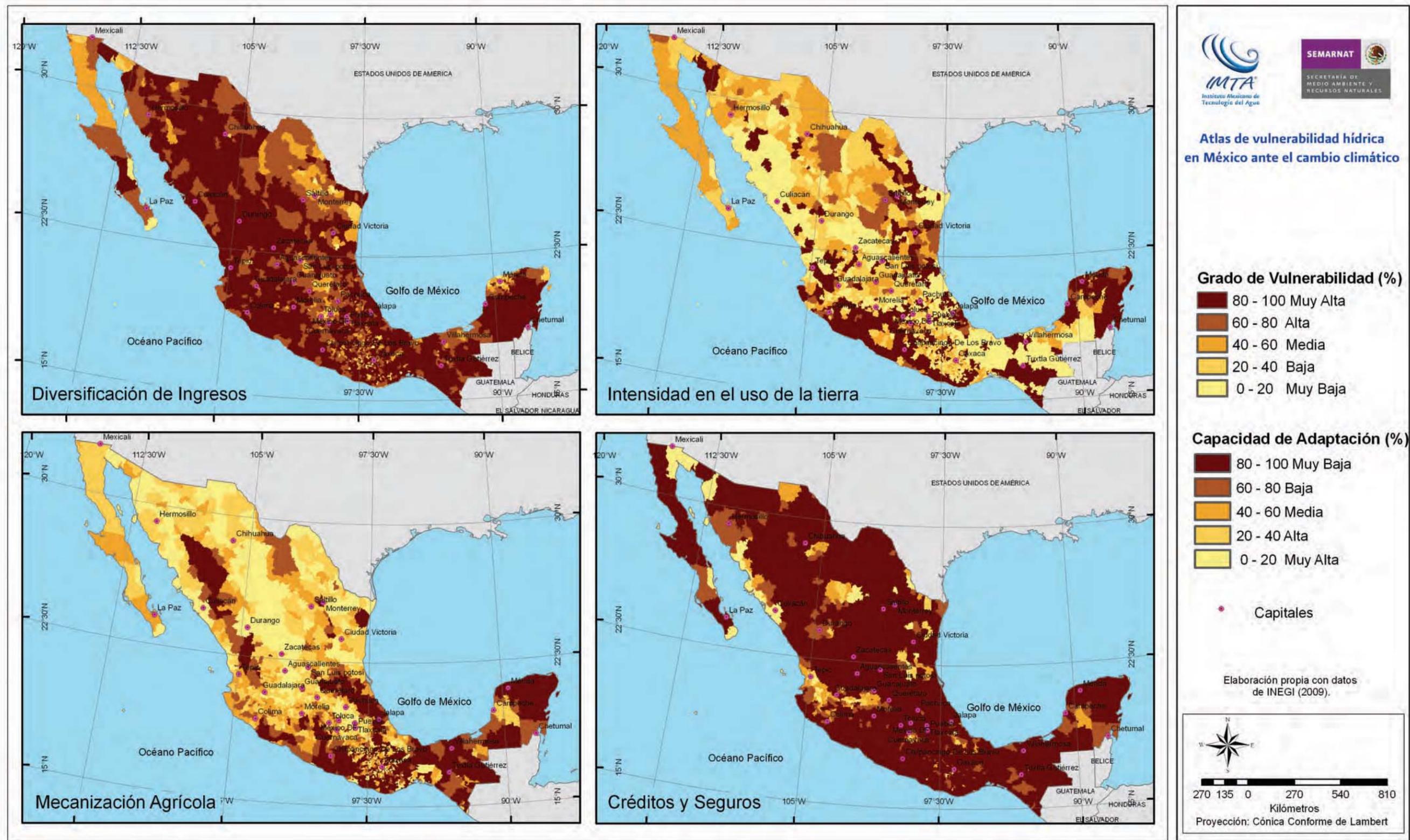
Capacidad de Adaptación (%)

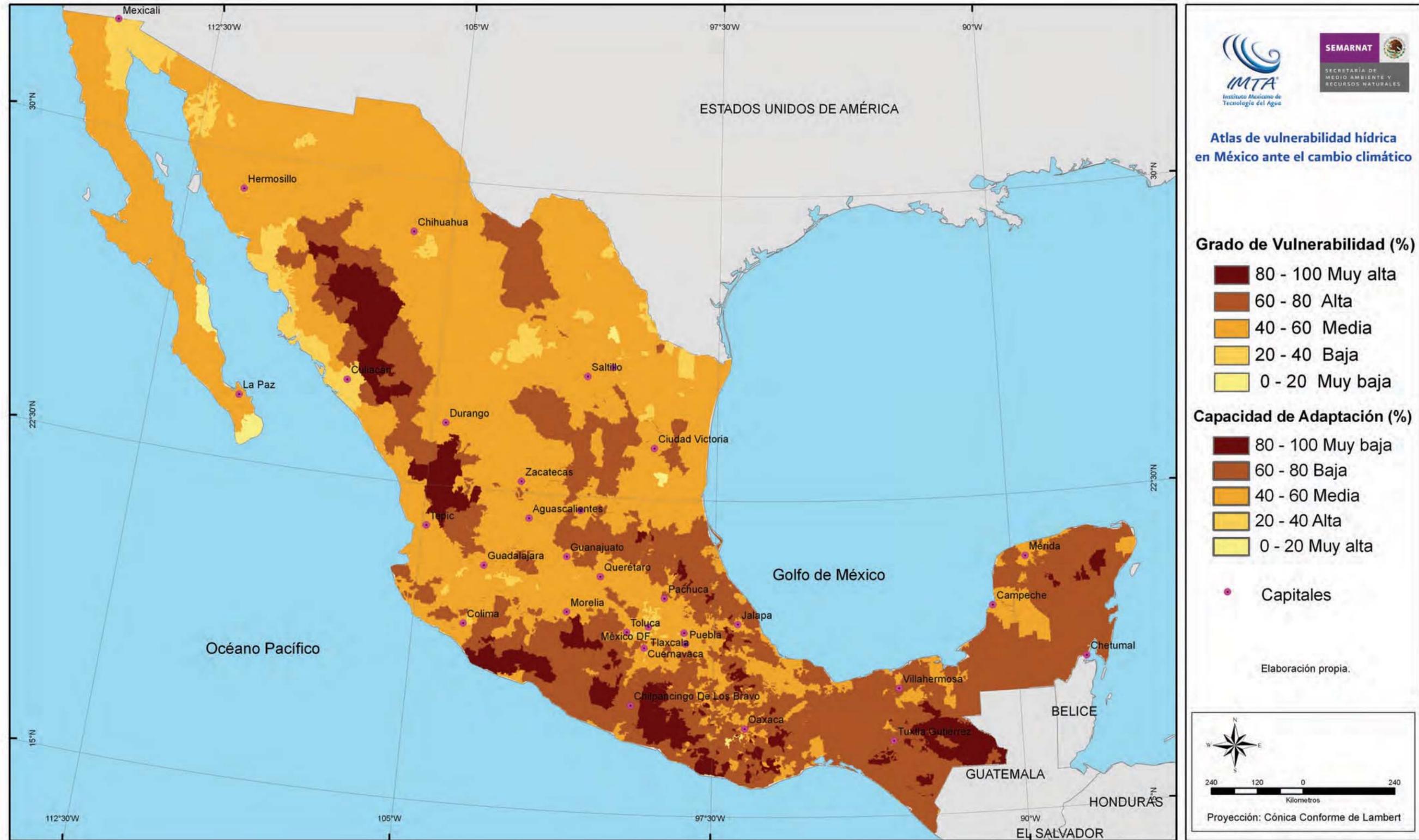
- 80 - 100 Muy baja
- 60 - 80 Baja
- 40 - 60 Media
- 20 - 40 Alta
- 0 - 20 Muy alta

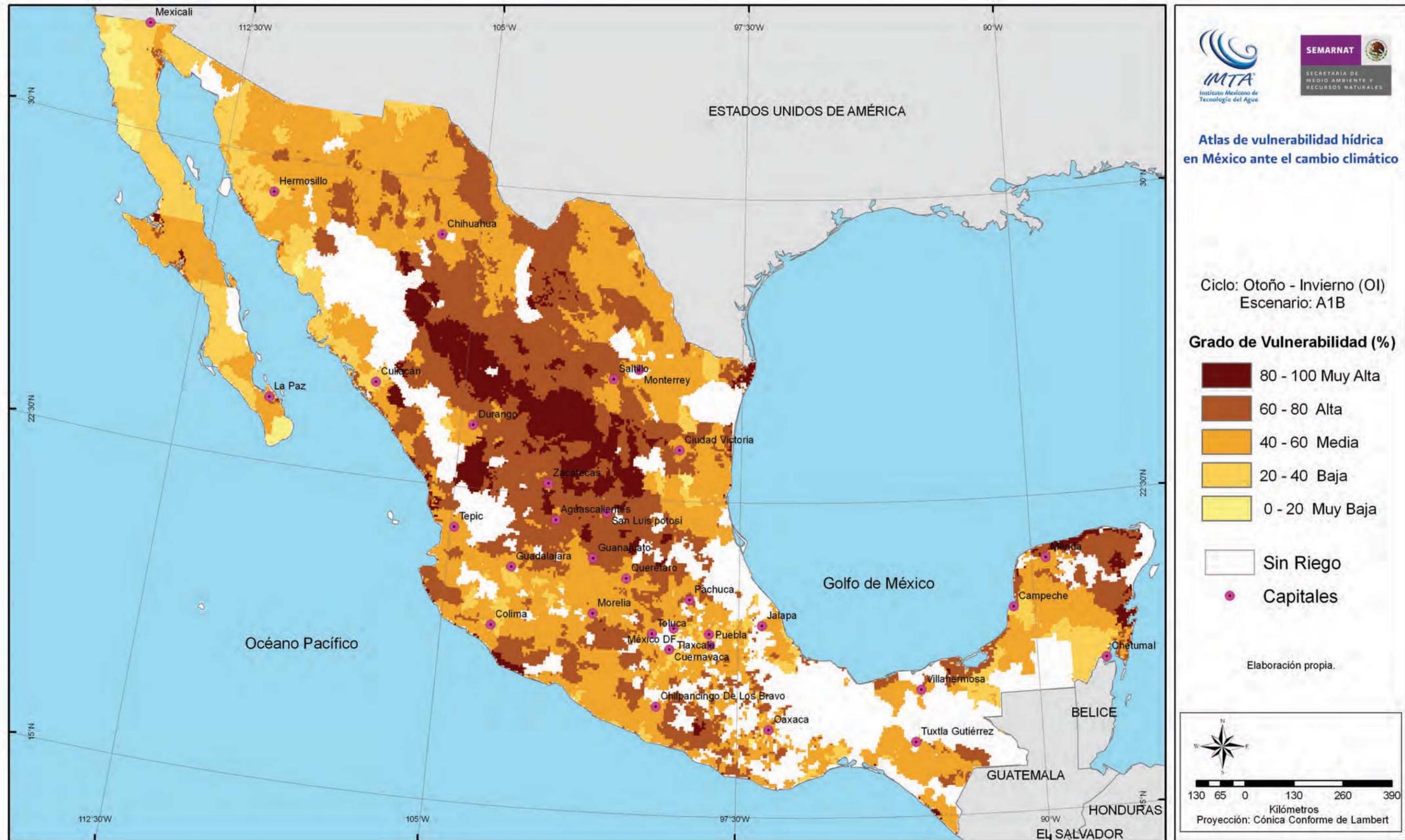
● Capitales

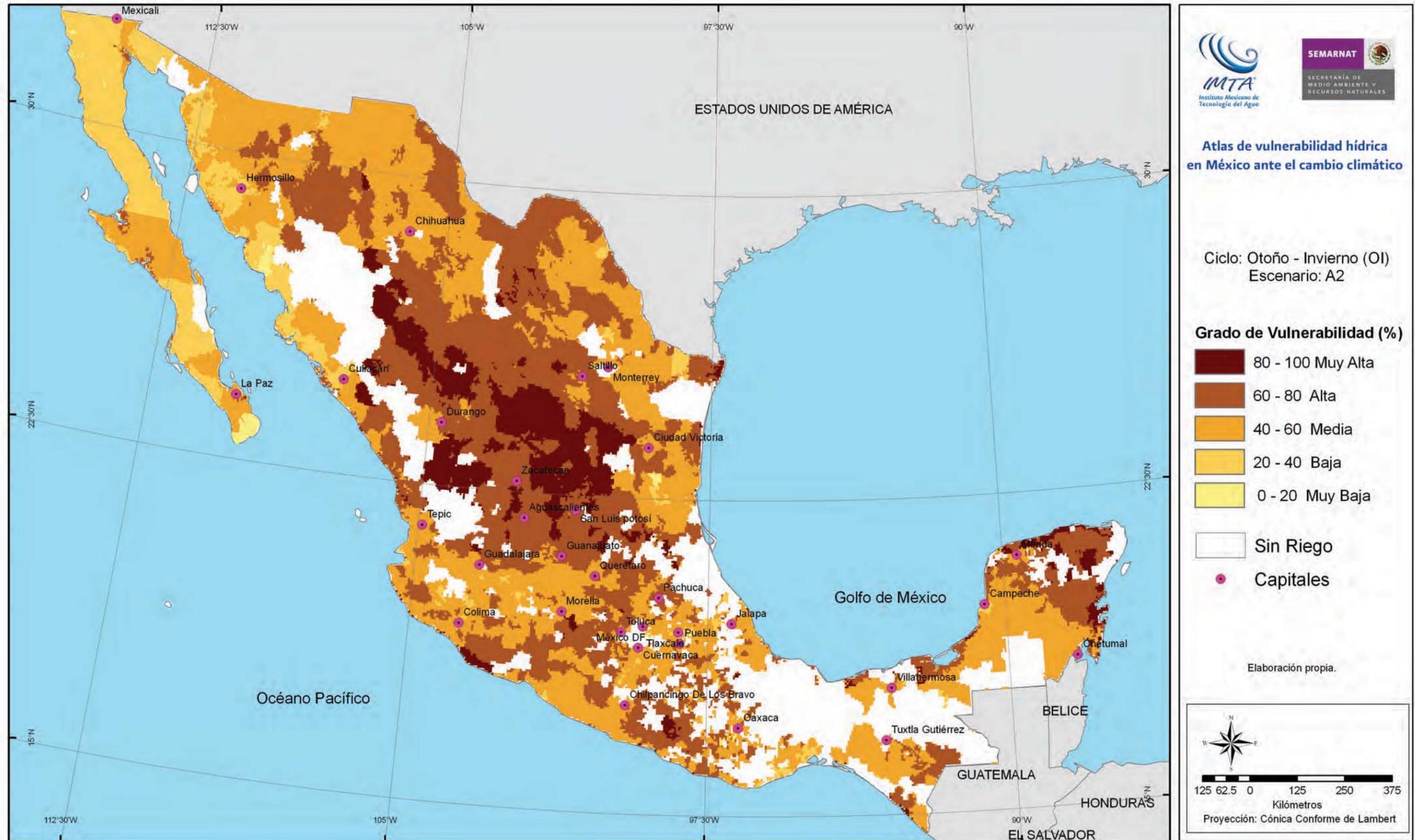
Elaboración propia con datos de CONAPO (2005) e INEGI (2009).

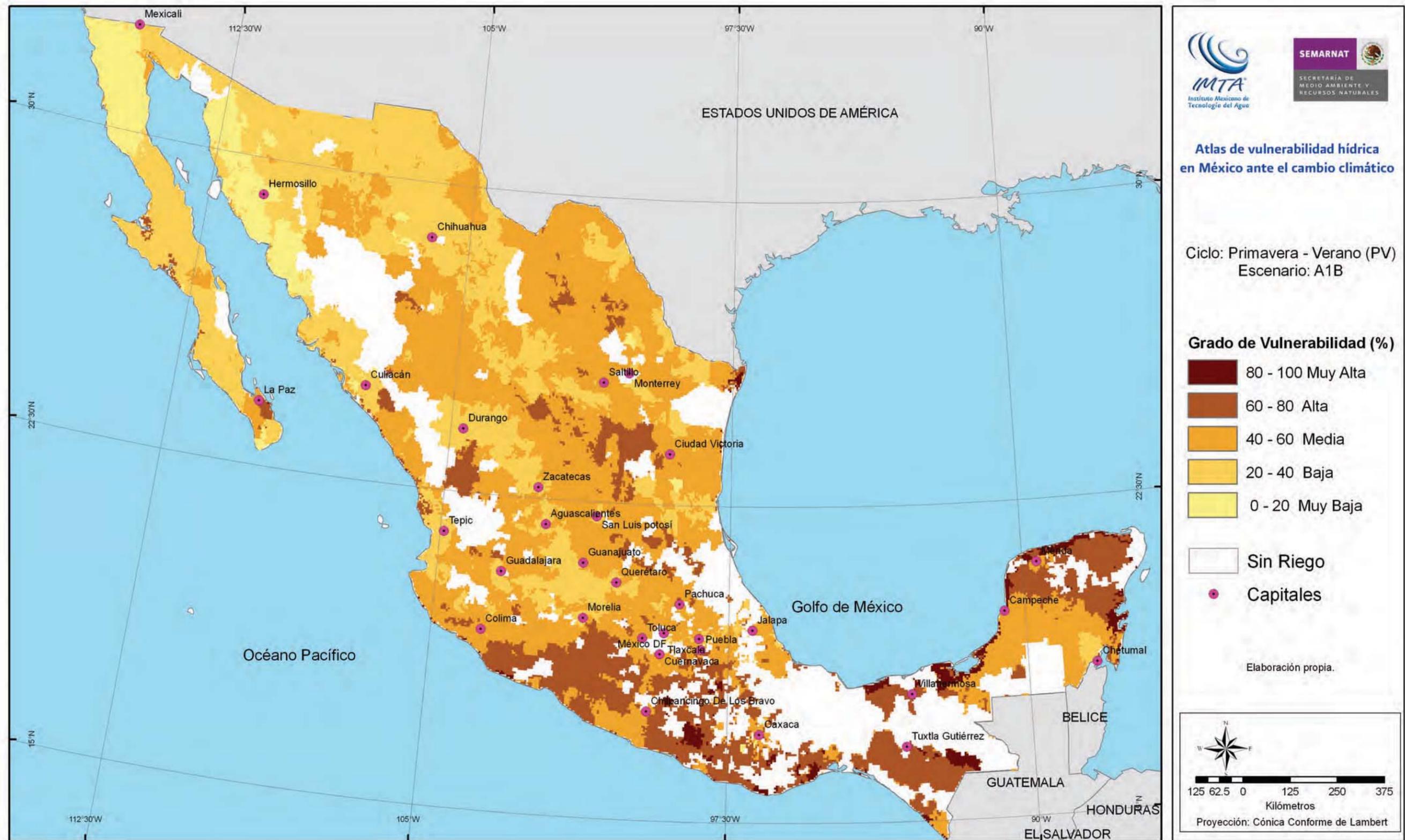


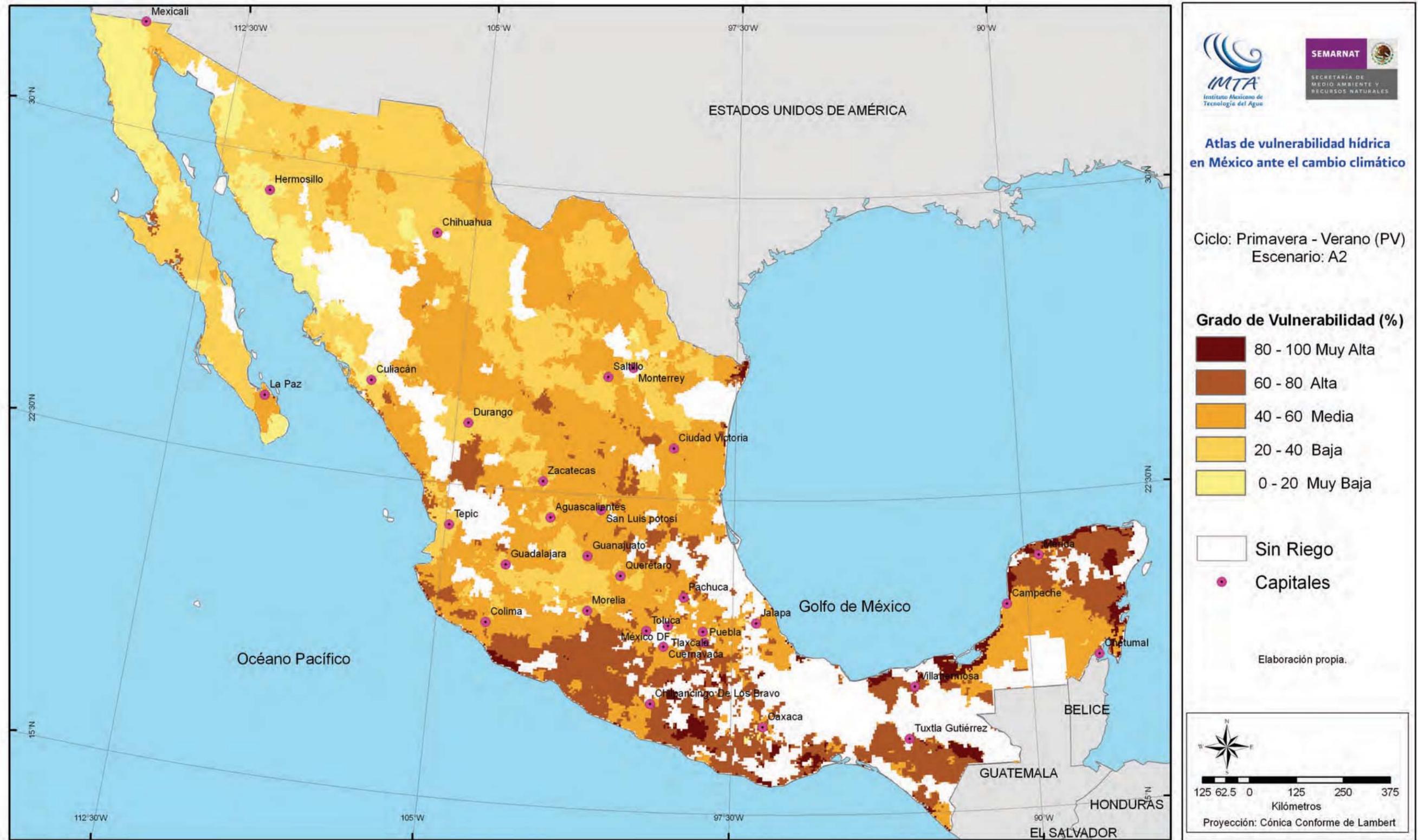












## Conclusiones y recomendaciones

Los sistemas agrícolas son ecosistemas antropogénicos en continua evolución que responden a cambios no solo climáticos sino también socioeconómicos relacionados con el proceso productivo como son el mercado, organización y gestión productiva, infraestructura, recursos, y tecnología. 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 implanten en el futuro, dadas su condiciones actuales.

Este estudio responde a la necesidad de identificar las regiones agrícolas bajo riego más vulnerables al cambio climático. Con las limitaciones en la disponibilidad de datos a nivel nacional, se usaron diversos indicadores para estimar la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático y se generaron mapas de vulnerabilidad para los ciclos agrícolas de otoño-invierno y primavera-verano usando proyecciones climáticas regionalizadas para dos escenarios de emisiones (A1B y A2).

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 a nivel de municipios disponible para 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. A medida que se dispongan de bases de datos de mejor calidad y con más variables, este estudio podrá actualizarse.

## Referencias

- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett and P.D. Jones. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research* 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548
- CONAGUA, 2009a. Estadísticas de producción agrícola de los Distritos de Riego. Comisión Nacional de Agua. Gerencia de Distritos de Riego. México, D. F.
- CONAGUA, 2009b. Características de acuíferos de país: Datos vectoriales y base de datos. Comisión Nacional de Agua. México, D. F.
- CONAGUA. 2010. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional de Agua. México, D. F. 249 pp.
- CONAPO. 2005. Índices de marginación. Consejo Nacional de Población. Base de datos. Mexico, D.F.
- Cresis. 2010. Sea Level Rise Maps. Center for RE mote Sensing of Ice Sheets. University of Kansas, USA. Disponible en línea, <http://www.cresis.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.
- Hodson, D.P., E. Martínez-Romero, J.W. White, J.D. Corbett, and M. Bänziger. 2002. Latin America Maize Research Atlas (v1.0). Mexico D.F.: CIMMYT. CD.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability climate change 2001. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, UK., University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. In: 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.
- INEGI. 1998. Datos vectoriales edafológicos 1:250,000. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. 2009. Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Estados Unidos Mexicanos. Aguascalientes, Ags.
- Lyengar, N.S. and P. Sudarshan. 1982. A Method of Classifying Regions from Multivariate Data. *Economic and Political Weekly. Special Article*: 2048-52.

- Jones, P. D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A re-analysis and an update to 1993. *J. Clim.*, 7, 1794-802.
- Loucks, D. P. y 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, M. J., y J. L., Pérez. 2008. Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. In: P. Martínez y A. Aguilar (eds). Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México. Vol. II. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda, W., P. Martínez, y L. Hernandez. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. In: P. Martínez y A. Aguilar (eds). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Vol. II. Eds. A. Aguilar y P. Martínez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Pp 73-83.
- Peduzzi, P.; H. Dao; and C. Herold. 2005. Mapping Disastrous Natural Hazards Using Global Datasets. *Natural Hazards*. 35 (2). 265 - 289.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2009. Información estadística agrícola con desagregación geográfica de acuerdo en nivel Distrito de Desarrollo Rural (DDR) (1999-2008) y nivel municipal (2003-2008). 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, U.K. 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). Pp 26. Disponible en línea, <http://www.eepsea.org>.

## Agradecimientos

Se agradece la participación de Eduardo Celis Lais que elaboró los mapas digitales y a Cesar Ricardo Minauro Cervera que realizó los cálculos para estimar los valores espaciales de los indicadores de vulnerabilidad. También se agradece al M. en C. Alberto Balancán Soberanis por su apoyo en la integración de los mapas, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su apoyo en la coordinación general del documento.



## Capítulo 6. Calidad del agua

*Antonio Javier García López, Norma Ramírez Salinas,  
Camilo Vázquez Bustos y Gabriela E. Moeller Chávez*





### Resumen

Se realizó la estimación del impacto del cambio climático sobre la calidad del agua en cuerpos superficiales de agua, considerándose para el estudio las cuencas del río Bravo, Lerma-Chapala y río Grijalva, usando una metodología determinístico-conservativa, para los escenarios A1B y A2 regionalizados para México. La estimación del impacto se llevó a cabo mediante la proyección de dos indicadores importantes en la calidad del agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los resultados obtenidos sugieren el desarrollo de políticas y medidas de adaptación a corto plazo para atenuar los impactos esperados en las cuencas en estudio y de esta manera alcanzar niveles razonables de sustentabilidad en el uso del agua.

### Introducción

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) fue creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El IPCC tiene como función analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus factibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo.

El IPCC en su informe de 2007, para responsables de políticas, señala con precisión “El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar” (IPCC, 2007).

El efecto del calentamiento global 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 la calidad del agua, así como el manejo de las fuentes de abastecimiento.

No obstante, usualmente el análisis del efecto del cambio climático a nivel mundial se ha enfocado a determinar y proyectar las consecuencias sobre la cantidad y no sobre la calidad del recurso hídrico. En este contexto, la falta de herramientas y modelos estandarizados para la proyección de los efectos del cambio climático sobre la calidad del agua emerge como una tarea a realizar. La generación e implementación de metodologías regionalizadas de modelos que se adapten a los requerimientos de las bases de datos históricos y permitan a través de estas la predicción de los comportamientos futuros (Santer, 2009) es, sin duda, un ejercicio académico interesante que puede generar información útil que permita proponer acciones de atenuación o políticas de adaptación a las regiones más vulnerable a este fenómeno global.

En este marco, el objetivo de este trabajo es la estimación del impacto del cambio climático sobre la calidad del agua en las cuencas de los ríos Bravo, Lerma-Chapala y Grijalva, usando la metodología determinístico-conservativa, para los escenarios A1B y A2 regionalizados para México. La estimación del impacto se realiza a través de la proyección de los indicadores de calidad del agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).



## Marco conceptual

En la investigación, la modelación hidrológica es una herramienta valiosa, ya que entre otros usos puede permitir el estudio de los procesos que gobiernan los impactos del cambio climático sobre los cuerpos superficiales de agua y sirve además para la proyección de los riesgos potenciales de parámetros de interés en los escenarios del futuro cambio (Praskievicz, 2009).

Aunque es inminente que la calidad del agua se verá afectada por el cambio climático, pocos estudios se han dirigido a la modelación de sus impactos potenciales en comparación con aquellos que se han enfocado a los flujos y otras variables hidrológicas (cuadro 1). Lo anterior se debe en gran medida a que generalmente no se cuenta con una base de datos de calidad del agua nutrida, confiable y consistente que pueda ser utilizada para alimentar a los modelos hidrológicos dinámicos. Además, la complejidad de la modelación hidrológica se incrementa con la inclusión de parámetros de calidad del agua (Whitehead, 2009).

Lo anterior, es la razón que justifica que en este trabajo se utilice una metodología determinístico-conservativa para estimar el impacto del cambio climático sobre la calidad del agua en tres cuencas de nuestro país. Aunque el modelo es limitado, proporcionará una primera aproximación del impacto del cambio climático sobre

la calidad del agua en nuestro país para dos escenarios futuros. Los resultados permitirán dirigir los esfuerzos de atenuación a las zonas con mayor impacto.

Es importante mencionar que en la estimación de los impactos del cambio climático sobre la calidad del agua, los programas de monitoreo de los sistemas acuáticos juegan un papel importante debido a que los datos que proporcionan reflejan el grado de contaminación actual y sirven como punto de partida para estimar el efecto potencial que el cambio climático puede ejercer. Dicha estimación se realiza a través de las distintas herramientas y aproximaciones de modelación para regular su impacto futuro (Feijóo, 1999).

### Selección de los indicadores de calidad del agua

Para determinar el estado en que se encuentran los cuerpos de agua superficiales se usan generalmente indicadores de calidad del agua. Estos indicadores se emplean como herramientas prácticas para guiar las investigaciones y servir a su vez como puntos de referencia para la implementación de políticas y regulaciones por parte del personal encargado de la toma de decisiones. Básicamente, un índice o indicador de calidad del agua proporciona un valor, a través de una expresión numérica, que acumula información robusta, que permite definir un nivel de calidad del agua a partir de una serie de valores predeterminados y previamente acordados.

En el presente trabajo se usaron dos indicadores para evaluar la calidad del agua avalados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA): Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). La  $DBO_5$  y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las descargas de agua residual de origen municipal y no municipal. La primera determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la segunda mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos (CONAGUA, 2010). Los criterios que conforman la escala de clasificación de calidad del agua, en función a su concentración, se muestran en la cuadro 2.

**Cuadro 2. Escalas de clasificación de la calidad del agua.**

Escala de clasificación de la calidad del agua		
Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ )		
Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
$DBO_5 \leq 3$	<b>EXCELENTE.</b> No contaminada	AZUL
$3 < DBO_5 \leq 6$	<b>BUENA CALIDAD.</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable.	VERDE
$6 < DBO_5 \leq 30$	<b>ACEPTABLE.</b> Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	AMARILLO
$30 < DBO_5 \leq 120$	<b>CONTAMINADA.</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	NARANJA
$DBO_5 > 120$	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA.</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	ROJO
Demanda Química de Oxígeno (DQO)		
$DQO \leq 10$	<b>EXCELENTE.</b> No contaminada	AZUL
$10 < DQO \leq 20$	<b>BUENA CALIDAD.</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.	VERDE
$20 < DQO \leq 40$	<b>ACEPTABLE.</b> Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	AMARILLO
$40 < DQO \leq 200$	<b>CONTAMINADA.</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.	NARANJA
$DQO > 200$	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA.</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales.	ROJO

**Cuadro 1. Estudios de modelación de los impactos del cambio climático sobre la calidad del agua. (WBUDG = Water Budget; SWAT = Soil and Water Assessment Tool; HBV = Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning; CAT = Climate Assessment Tool).**

Autor	Cuenca de Estudio	GCM(s)	Período de Estudio	Modelo Hidrológico	Resultados
Mimikou et al. (2000)	Grecia (9450 km <sup>2</sup> )	HadCM2; UKHI	2050s	WBUDG	Decremento en el corrimiento y OD; incremento en la DBO y amonio
Varanou et al. (2002)	Grecia (2796 km <sup>2</sup> )	HadCM2; ECHAM; CSIRO; CGCM	2080s	SWAT	Decremento en el corrimiento y transporte de nutrientes
Bouraoui et al. (2004)	Finlandia (1682 km <sup>2</sup> )	Ninguno (retrospectivo)	1965–1998	SWAT	Incremento en el corrimiento invernal; incremento en el transporte de nutrientes anual
Arheimer et al. (2005)	Suecia (1900 km <sup>2</sup> )	HadAM3H; HADCM2; ECHAM4/OPYC3	2071–2100	HBV	Incremento en las cargas de nutrientes en el intervalo del 10–33%
Imhoff et al. (2007)	Maryland (1900 km <sup>2</sup> )	ECHAM4	2010–2039	CAT	Incremento en la carga de nutrientes del 10%

## Selección de las cuencas

La selección se realizó en función de dos aspectos: importancia de la cuenca y disponibilidad en cantidad y calidad de datos de calidad del agua. Las cuencas de los ríos Bravo y Lerma-Chapala fueron seleccionadas debido a que presentan alta actividad económica y por la superficie y longitud que abarcan. Adicionalmente, la cuenca Lerma-Chapala contiene al lago de Chapala que es el más grande de los lagos interiores de México con una extensión de 1 116 km<sup>2</sup>. La cuenca río Grijalva, al igual que la cuenca del río Bravo, fue seleccionada por sus dimensiones e importancia ambiental que presenta (CONAGUA, 2010).

## Objetivo

Estimar el impacto del cambio climático sobre la calidad del agua en las cuencas de los ríos Bravo, Lerma-Chapala y Grijalva usando una metodología determinístico-conservativa, para los escenarios A1B y A2 regionalizados para México.

## Metodología general

### Análisis de los datos

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron cuatro tipos de datos: a) de calidad del agua, b) climatológicos, c) demográficos, y d) escenarios A1B y A2 regionalizados para México.

Los datos de calidad del agua se obtuvieron de la base de datos de calidad del agua proporcionada por la CONAGUA. La base de datos incluye los valores de los parámetros seleccionados de DBO<sub>5</sub>, DQO y temperatura del agua para cada estación de monitoreo y cuenca en estudio. Los datos abarcan un período comprendido entre 1975 y 2008. Para este estudio se seleccionaron 30, 16 y 10 sitios de monitoreo de las cuencas de los ríos Bravo, Lerma-Chapala y Grijalva, respectivamente, los cuales cuentan con datos suficientes de calidad del agua para realizar el presente trabajo. Estos datos son utilizados para conocer el estado actual y pasado de la calidad de los cuerpos de agua, y de esta manera poder proyectar su comportamiento a los escenarios futuros A1B y A2 regionalizados para México.

Los datos climatológicos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) e incluyen temperatura media del aire y abarcan el mismo

período de tiempo que los datos de calidad del agua. Esta información se aplicó para correlacionar la temperatura media del aire con la temperatura del agua en cada estación de monitoreo y, de esta manera, realizar la estimación de la temperatura hídrica a partir de la temperatura media del aire para los escenarios de clima futuros.

Los escenarios A1B y A2 fueron regionalizados para México empleando el método *Reliability Ensemble Averaging* (REA). Los resultados obtenidos han permitido regionalizar los datos de precipitación y temperatura de superficie para los escenarios A1B y A2 en el siglo XXI, y convertirlos a una malla regular de 0.5 x 0.5° (Martínez, 2008). En este trabajo se utilizaron los datos de temperatura de superficie para estimar la temperatura hídrica para cada escenario futuro y para cada estación de monitoreo. Posteriormente, los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO, en conjunto con los datos de crecimiento poblacional se proyectaron para cada escenario en cuestión. Las proyecciones del crecimiento poblacional se realizaron a partir de los datos registrados por el INEGI y fueron empleadas para hacer las estimaciones futuras del Carbono Orgánico Total (COT), para los municipios que conforman las tres cuencas en estudio. Es importante indicar que la determinación del impacto sobre la calidad del agua sólo se estimará en función del incremento en la temperatura y del crecimiento poblacional.

### Consideraciones en la metodología

Las consideraciones siguientes fueron empleadas en el desarrollo de la metodología para estimar el impacto sobre la calidad del agua en las cuencas en estudio.

Los valores medios típicos para los parámetros DBO<sub>5</sub> y DQO, expresados como porcentaje de la Demanda Teórica de Oxígeno (DTeO), son 52 y 83%, respectivamente (Eckenfelder, 1970)

El valor medio típico del Carbono Orgánico Total (COT), expresado como porcentaje del Carbono Orgánico Teórico (COTe) es 95% (Eckenfelder, 1970)

La relación DBO<sub>5</sub>/DBO<sub>f</sub> varía de acuerdo con la materia orgánica presente en el agua, sin embargo un valor típico es 0.77 (Eckenfelder, 1970)

Para obtener las estimaciones a futuro del COTe, se considera a la población como la principal variable de aporte, puesto que se desconoce la proporción ingresada al agua resultado de actividades industriales y/u otras actividades antropogénicas

## Ecuaciones para la estimación de la DBO<sub>5</sub> y DQO

A continuación se presenta un resumen de las ecuaciones empleadas en el desarrollo de la metodología.

La relación entre DBO<sub>5</sub> y COT tiene un comportamiento lineal y se puede representar a través de la ecuación 1.

$$DBO_5 = [1.87 * COT] - 17 \quad (1)$$

De la ecuación 1, si se conoce el valor de la DBO<sub>5</sub>, es posible estimar la concentración de COT de acuerdo con la ecuación 2

$$COT = \frac{[DBO_5 + 17]}{1.87} \quad (2)$$

En base a consideraciones cinéticas, la relación entre DBO<sub>5</sub> y DBO<sub>f</sub> se presenta en la ecuación 3

$$\frac{DBO_5}{DBO_f} = (1 - 10^{-5K}) \quad (3)$$

donde  $K$  es la constante cinética de biodegradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos presentes en la muestra. Combinando la ecuación de la consideración "c" de la sección anterior con la ecuación 3, el valor de  $K$  es estimado a 0.1277 para condiciones estándar (20°C).

La variación del valor de la constante cinética  $K$  con la temperatura del agua puede estimarse mediante la ecuación de Van't Hoff-Arrhenius,

$$K_T = K_{20} * \theta^{(T-20)} \quad (4)$$

donde  $K_T$  es el valor de la constante cinética a una temperatura  $T$  (°C),  $K_{20}$  es el valor de la constante a 20°C y  $\theta$  es un parámetro que varía ligeramente con la temperatura. Los valores típicos utilizados para  $\theta$  son  $\theta=1.135$  (4°- 20°C) y  $\theta=1.056$  (20°- 30°C) (Schroepfer, 1964).

### Estimación de los valores promedio para los indicadores DBO<sub>5</sub> y DQO

Los datos históricos de calidad del agua de las diferentes estaciones de monitoreo utilizados en este trabajo presentan variabilidad en composición, razón por lo cual fueron tratados por medio de análisis estadístico. La estimación de los valores promedio de los parámetros de calidad del agua históricos y actuales se realizó a través del método propuesto por Eckenfelder (Eckenfelder, 1970). Este método supone que los resultados obtenidos de una campaña de

monitoreo son fenómenos aleatorios de distribución normal. De esta manera, los datos históricos de calidad del agua se llevaron a un gráfico probabilístico en el cual el eje de las abscisas representa la probabilidad y el eje de las ordenadas los valores correspondientes de cada parámetro. Como siguiente paso, los datos obtenidos se linealizaron trazando la recta que mejor se ajustó a dicho conjunto de puntos. La línea recta generada es denominada línea de Henry, entonces, el valor medio estadístico del conjunto de datos en cuestión es el valor de la ordenada que corresponde al 50% de probabilidad. La metodología se aplicó para el procesamiento de todas las variables históricas, y fue el punto de partida para estimar el comportamiento de las mismas para los escenarios futuros.

### Estimación de la temperatura del agua a partir de la temperatura ambiente

Se utilizaron dos aproximaciones para la estimación de la temperatura hídrica a partir de la temperatura media del aire (Morrill, 2005). La primera consistió en linealizar los datos de las parejas de temperatura ambiente en el eje de las abscisas y la temperatura del agua en el eje de las ordenadas para una década determinada. Con esto se obtuvieron los valores de temperatura con probabilidad del 50% por período de tiempo determinado y se correlacionó con la temperatura existente en cada estación de muestreo. A partir de estos últimos, se obtuvo el promedio de los valores históricos de cada uno de ellos para adicionar el incremento estipulado para los horizontes 2020, 2050 y 2080, de acuerdo con los valores regionalizados para los escenarios A1B y A2. Una vez obtenidos estos incrementos, la segunda aproximación consistió en hacer la conversión de la temperatura ambiente a temperatura del agua empleando una correlación con los datos históricos totales para aumentar la sensibilidad de la misma.

## Mapas de calidad del agua para las cuencas de los ríos Bravo, Lerma-Chapala y Grijalva

En base a la metodología expuesta se generaron mapas de calidad del agua para las cuencas de los ríos Bravo, Lerma-Chapala y Grijalva, para los escenarios A1B y A2 regionalizados para México. En el mapa 6.1 se presenta la ubicación sobre el territorio nacional de las tres cuencas en estudio. Los mapas que indican la calidad del agua se presentan por cuenca, por escenario y por indicador de calidad del agua. Es importante mencionar que los mapas de calidad del agua para los escenarios futuros fueron generados sin considerar medidas de adaptación o políticas que atenúen los impactos.

### Mapas para la cuenca río Bravo

Los mapas 6.2 a 6.5 presentan el comportamiento futuro de los indicadores DBO y DQO para los escenarios A1B y A2 proyectados para los años 2020, 2050 y 2080. Se puede observar que para el año 2020 la calidad del agua en la cuenca, en general, se mantiene como aceptable para ambos indicadores. Sin embargo, para los años 2050 y 2080 se espera que la calidad del agua cambie a contaminado y fuertemente contaminado, respectivamente, independientemente del escenario.

### Mapas para la cuenca Lerma-Chapala

Los mapas 6.6 a 6.9 muestran el comportamiento futuro de los indicadores DBO y DQO para los escenarios A1B y A2 proyectados para los años 2020, 2050 y 2080. En el caso del indicador DBO, se observa para el año 2020 una

fuerte contaminación de la cuenca en la región del estado de México y éste disminuye a medida que se acerca al lago de Chapala en el estado de Jalisco, donde la calidad del agua se presenta como aceptable. Sin embargo, para los años 2050 y 2080 la calidad en la cuenca, en general, cambiará a aceptable y contaminada respectivamente, independientemente del escenario considerado.

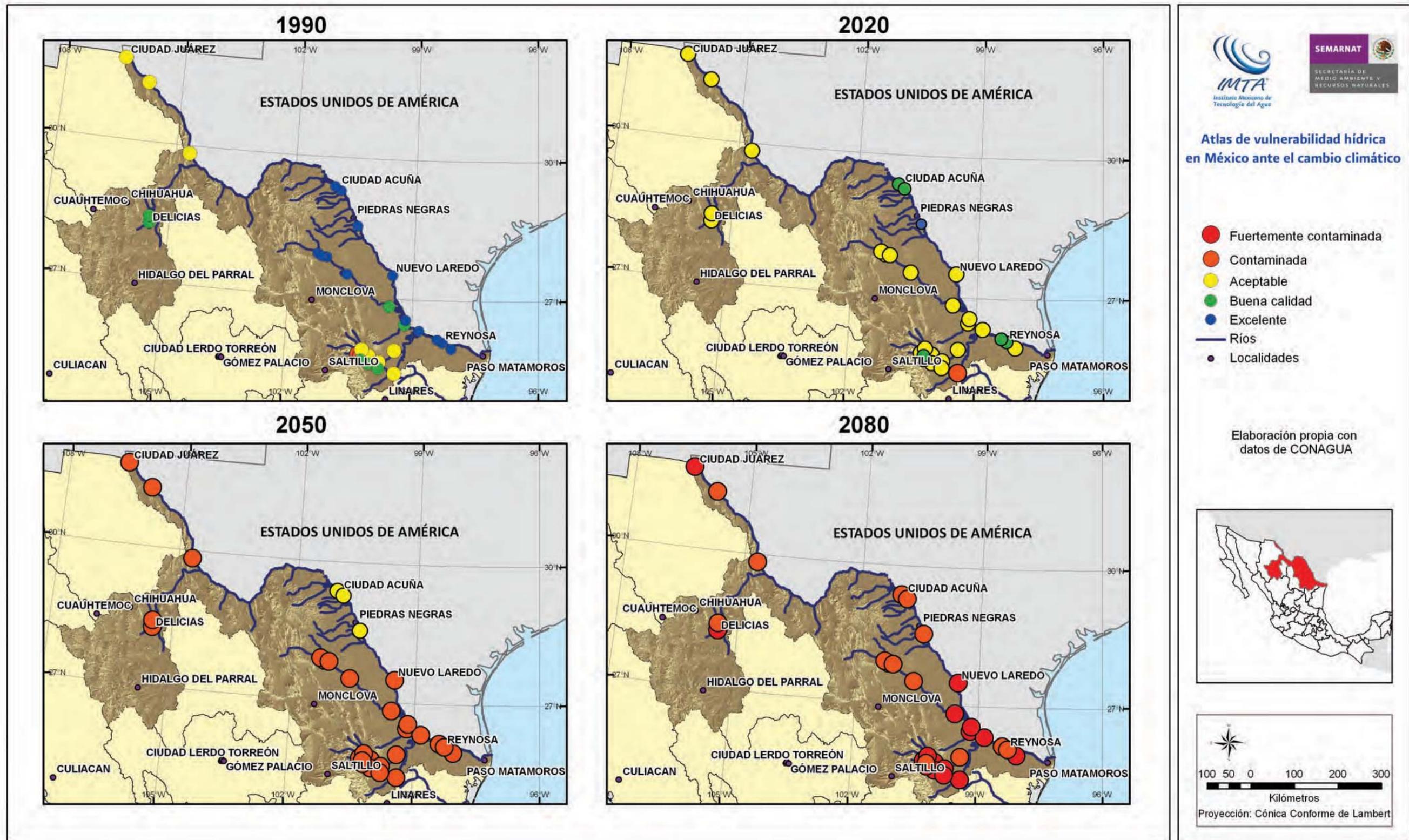
Para el caso de la DQO se espera un comportamiento similar al de la DBO para el año 2020, con una alta contaminación en el Estado de México y que disminuye conforme se acerca al lago de Chapala donde la calidad en DQO se presenta como buena. Para los años 2050 y 2080 la calidad de la cuenca cambiará a contaminada y fuertemente contaminada respectivamente, independientemente del escenario considerado. Es importante resaltar que la región con mayor impacto es en el Estado de México donde existe una alta actividad industrial. Por lo tanto, serán necesarias medidas de adaptación y políticas que atenúen los impactos a corto plazo en dicha región.

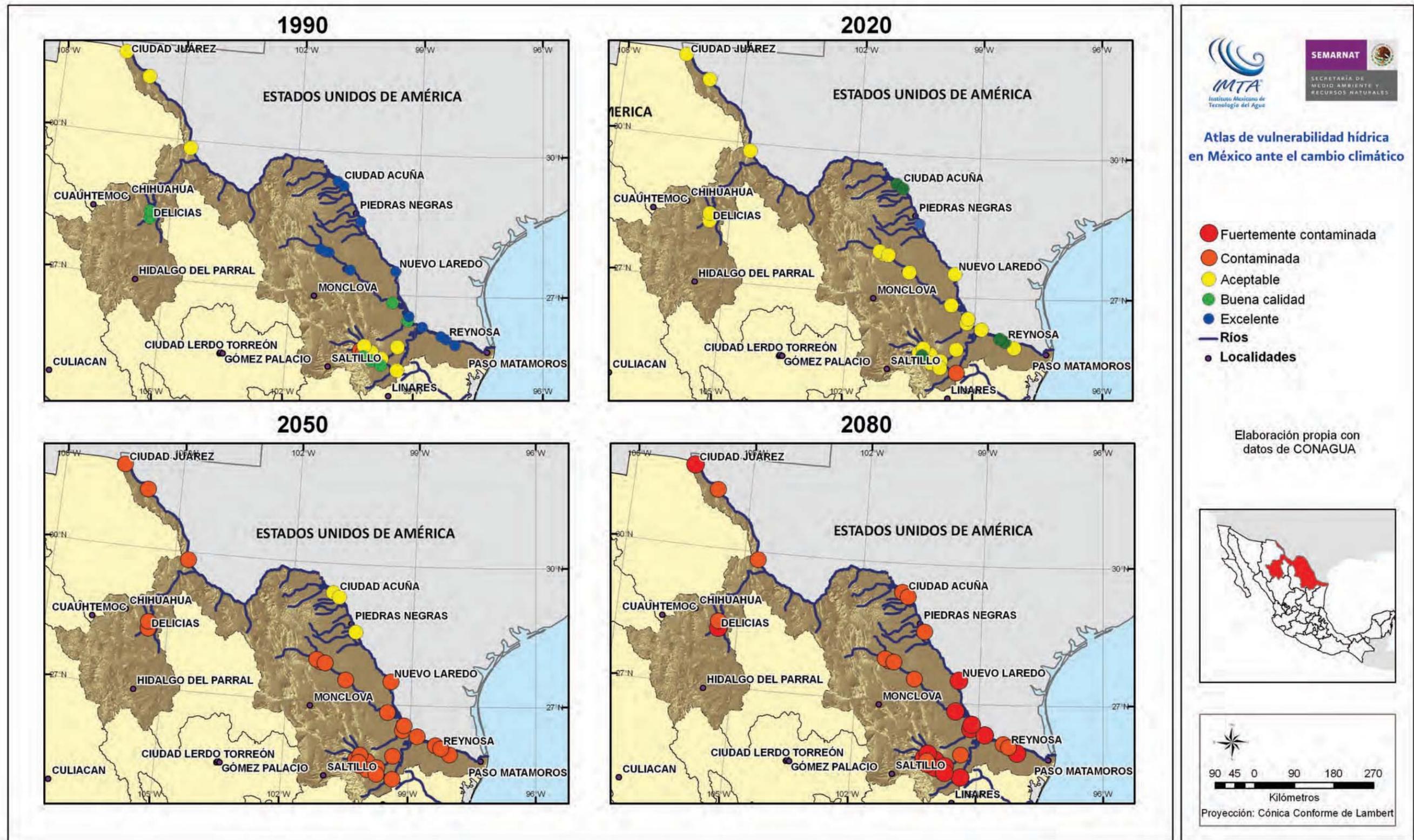
### Mapas para la cuenca del río Grijalva

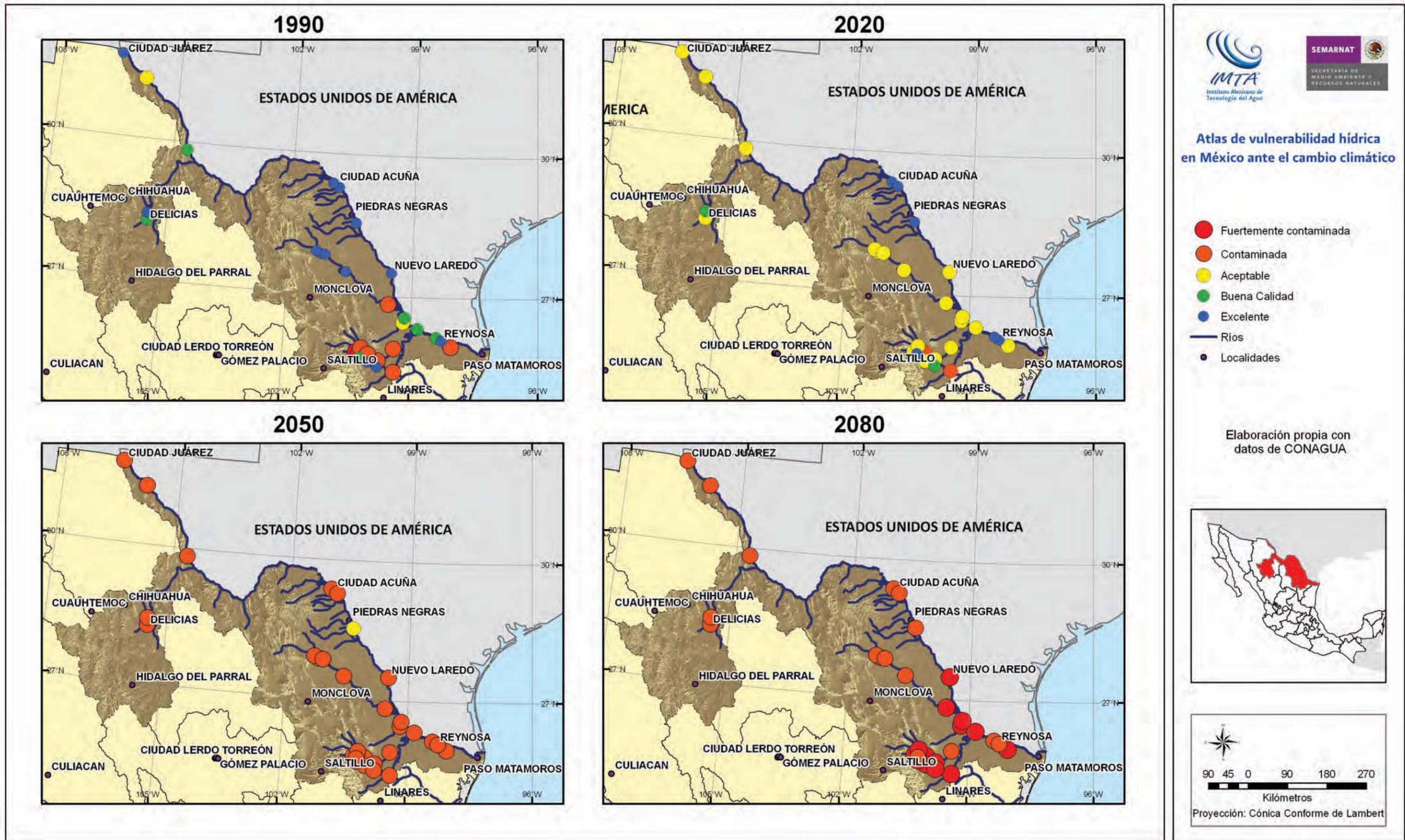
Los mapas 6.10 a 6.13 muestran el comportamiento futuro de los indicadores DBO y DQO para los escenarios A1B y A2 proyectados para los años 2020, 2050 y 2080. En el caso del indicador DBO se observa para el año 2020 una calidad del agua aceptable, en toda la cuenca. Sin embargo, para los años 2050 y 2080 la calidad en la cuenca, en general, cambiará a contaminada y fuertemente contaminada respectivamente, independientemente del escenario considerado.

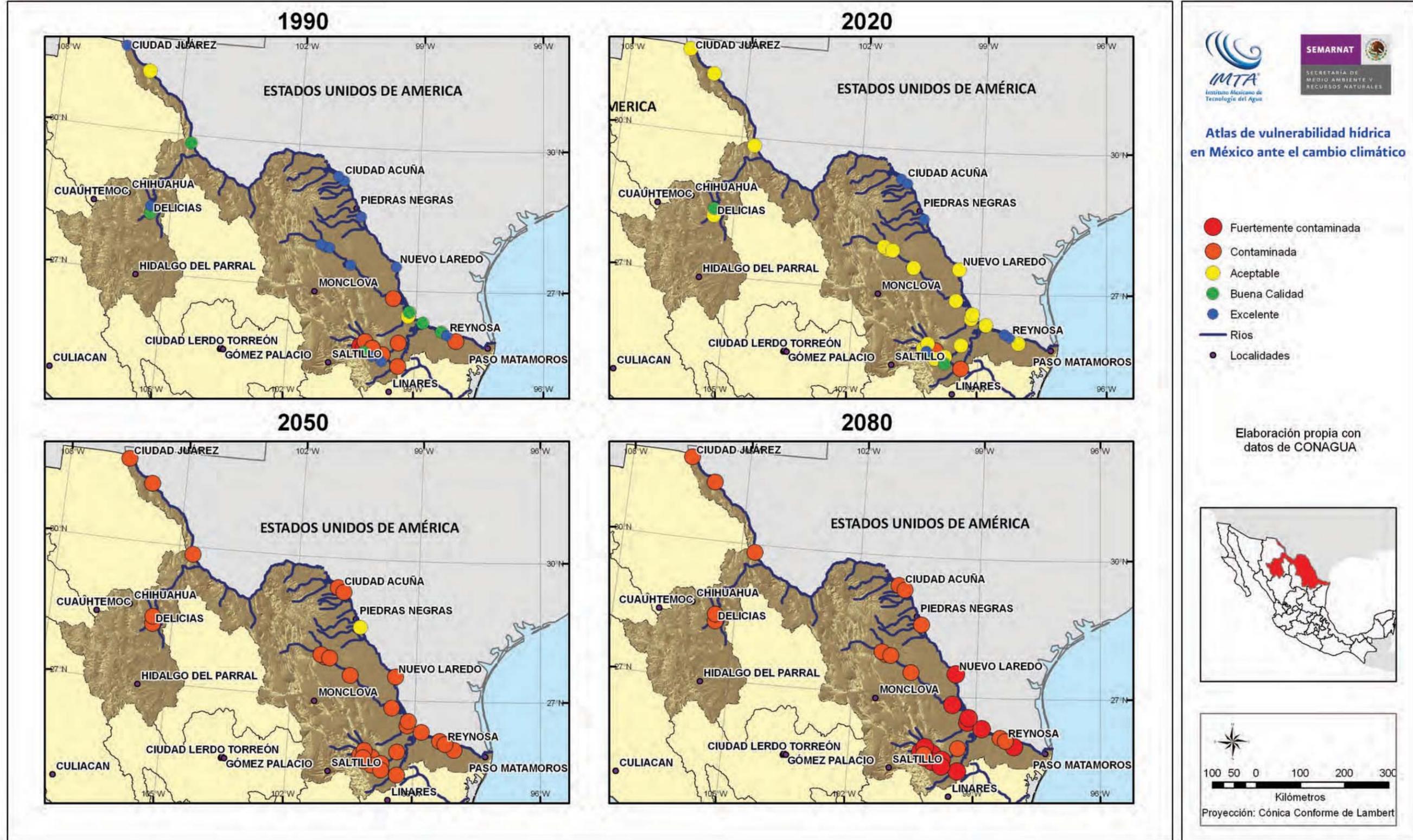
Para el caso de la DQO el comportamiento es diferente al de la DBO para el año 2020, ya que la calidad del agua para la cuenca se espera que se encuentre entre buena y aceptable. Para los años 2050 y 2080 la calidad del agua de la cuenca cambiará a contaminada, independientemente del escenario considerado.

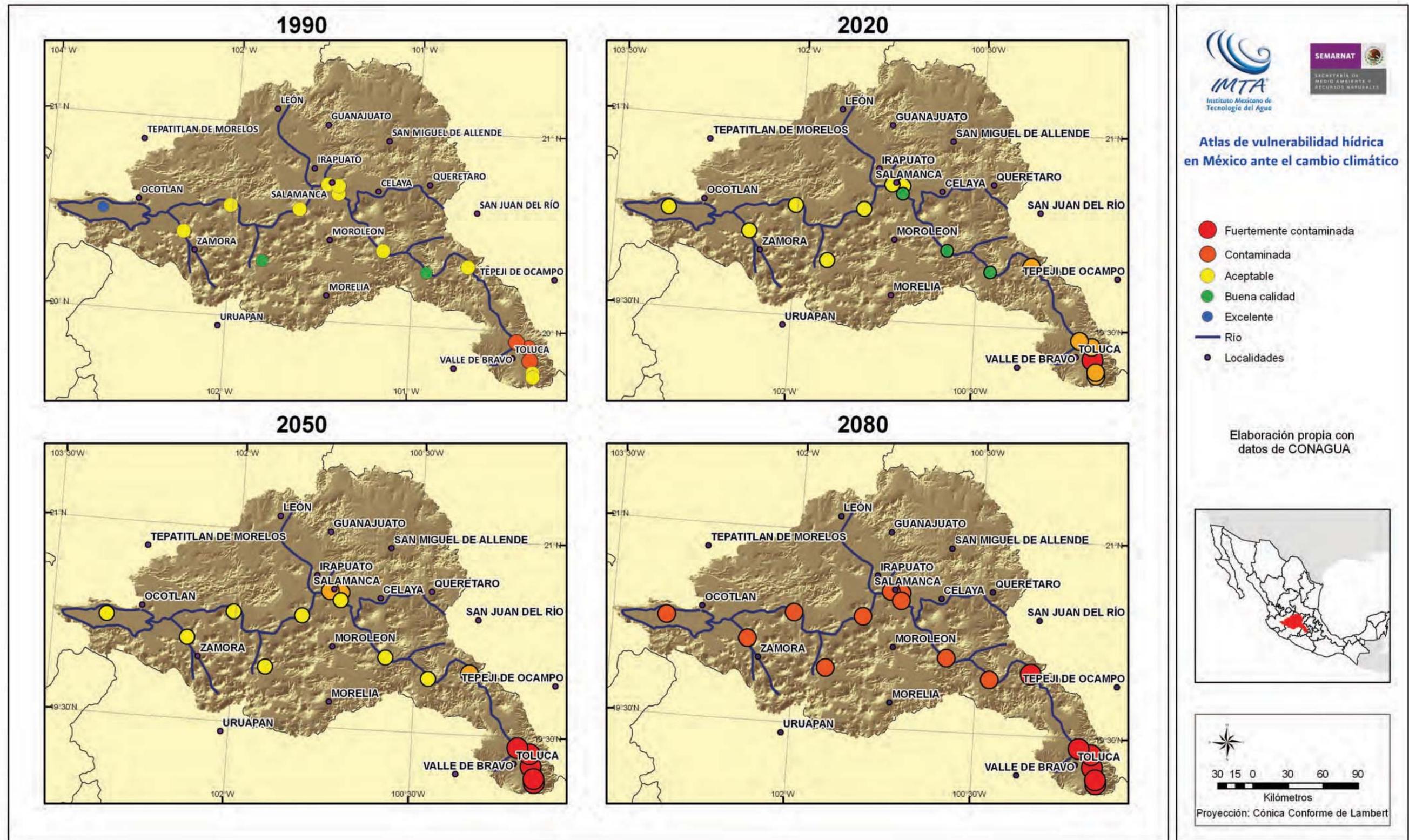


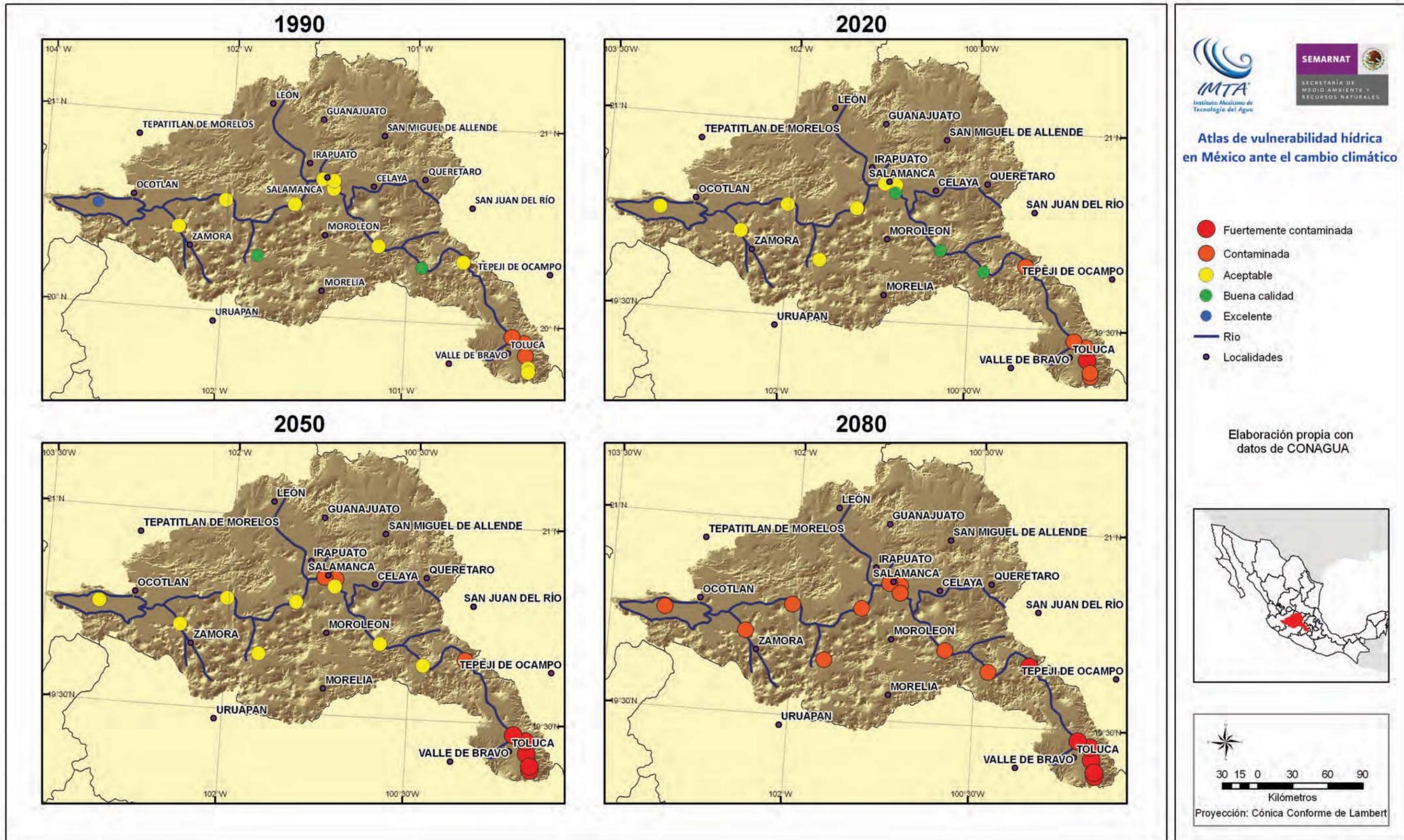


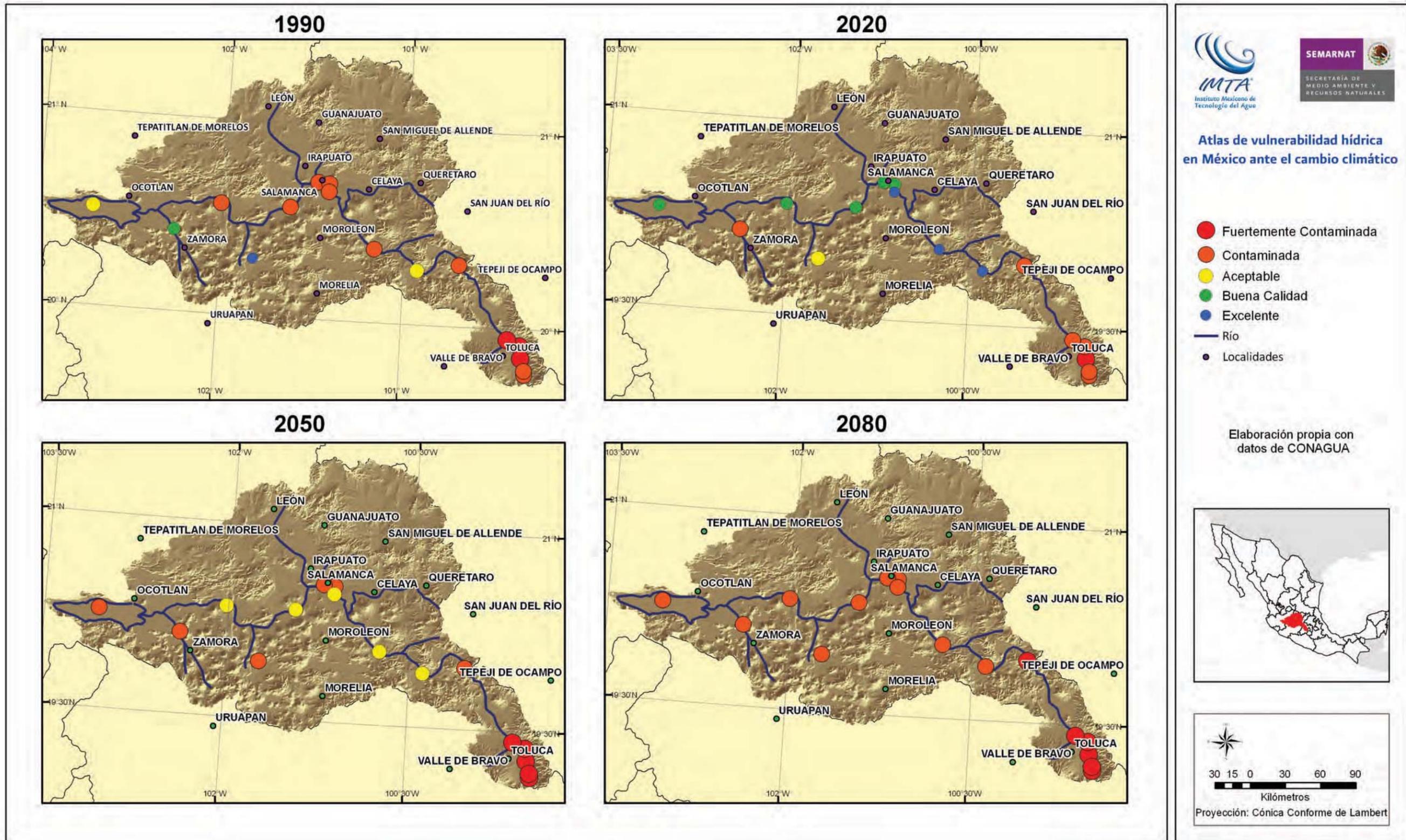


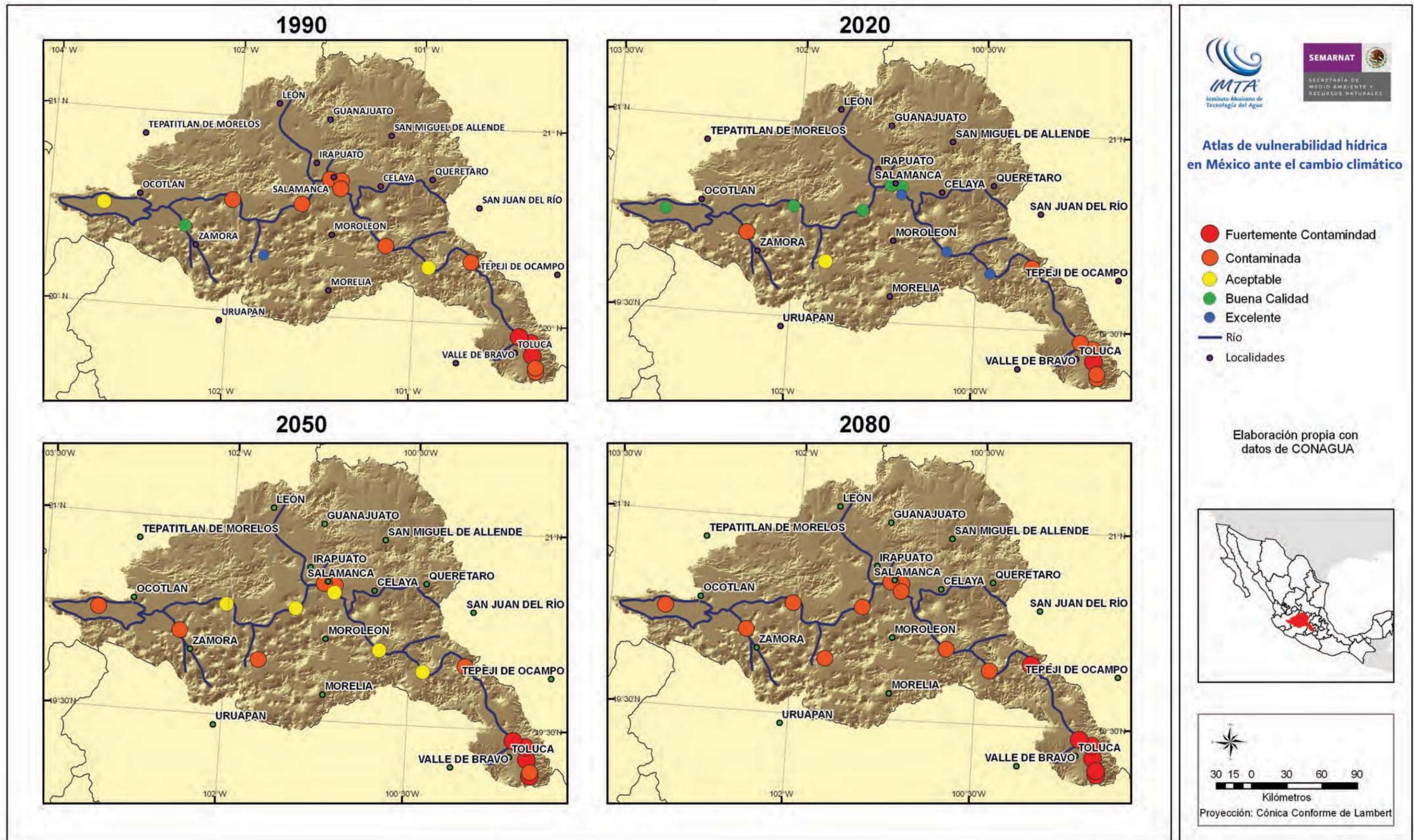




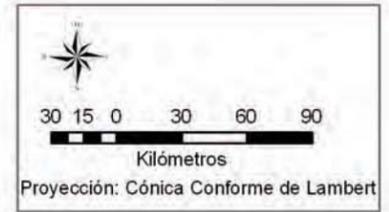


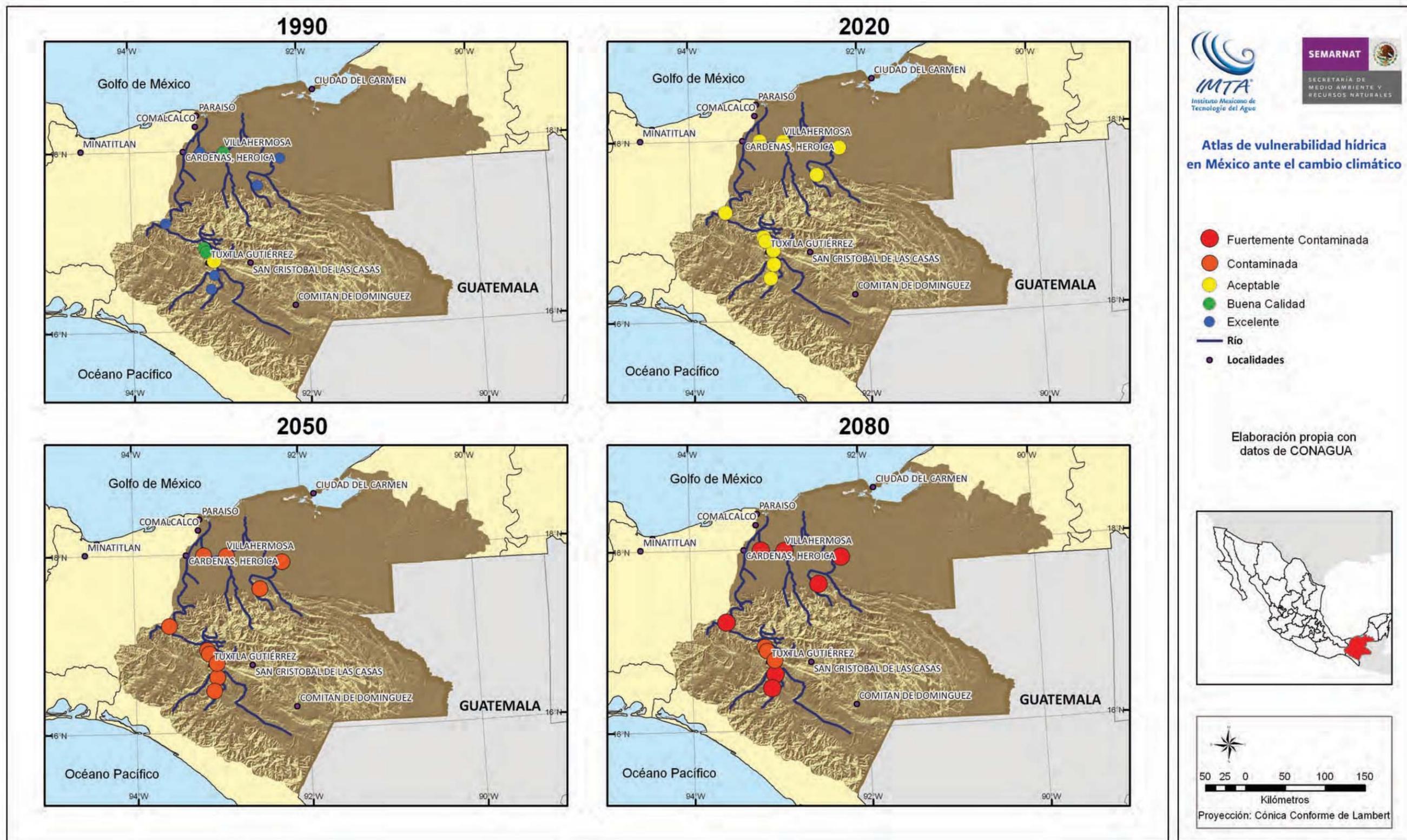


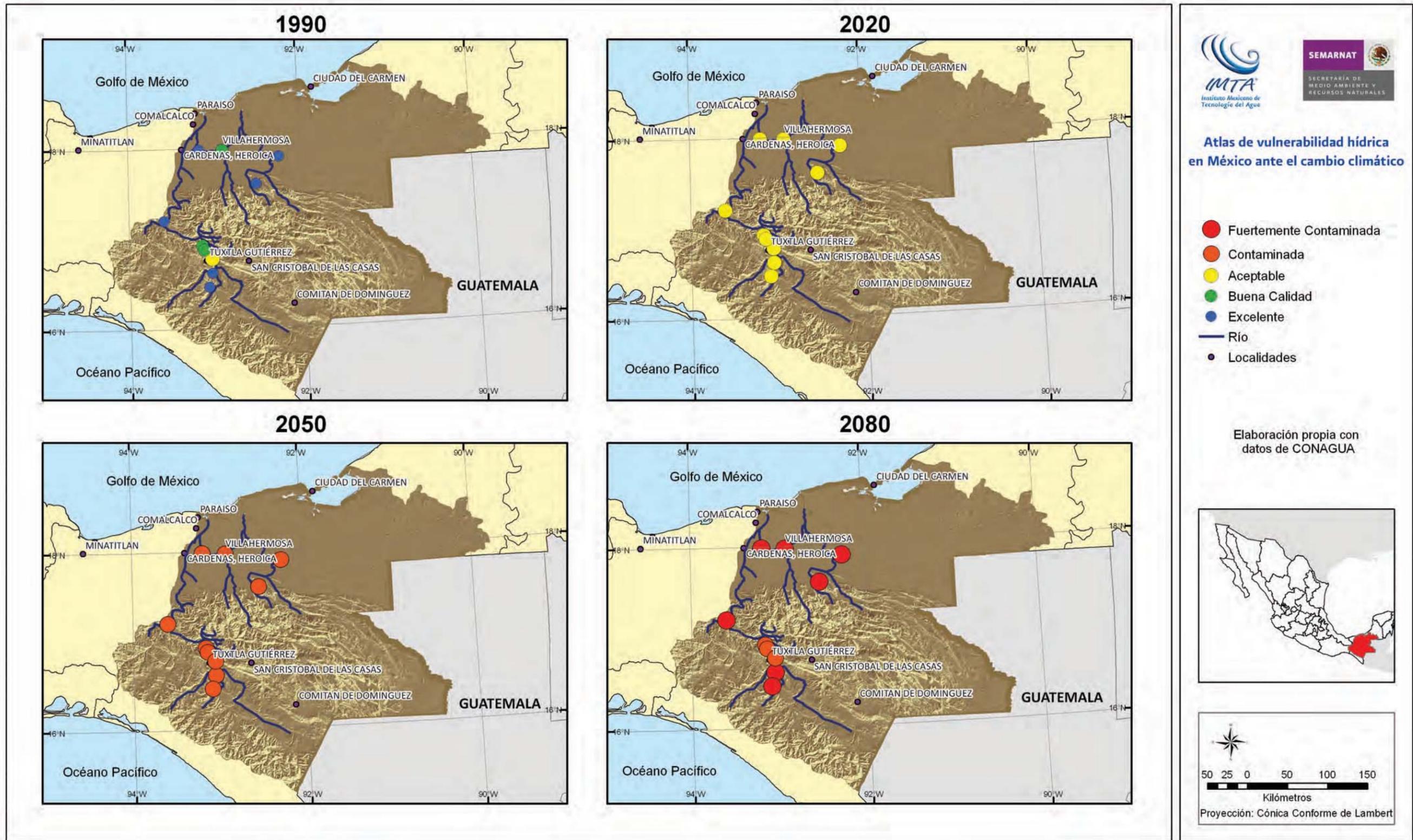




Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático



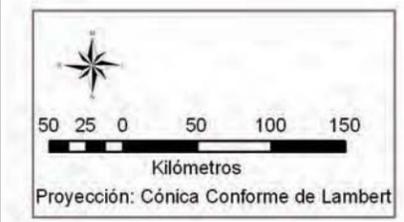


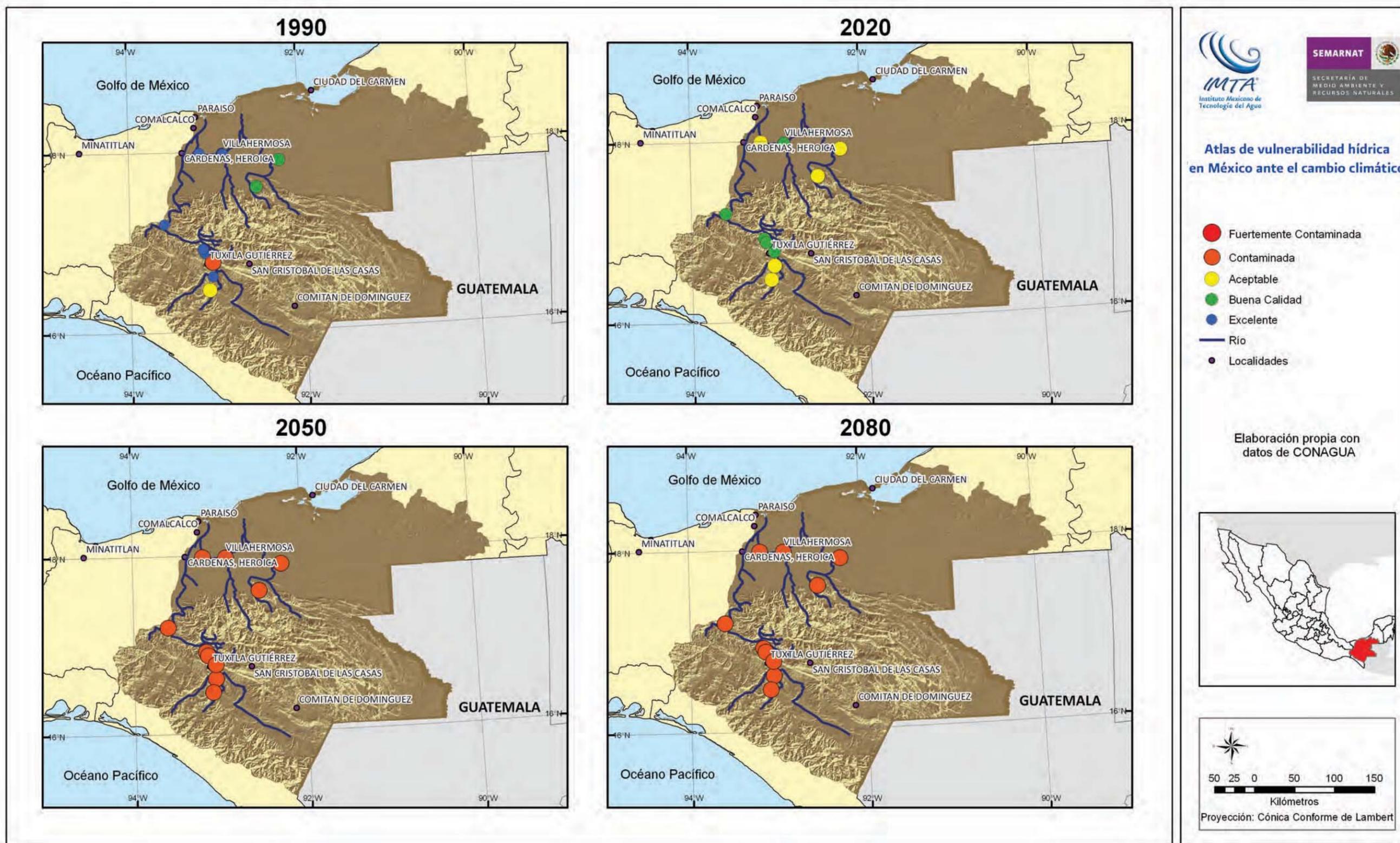


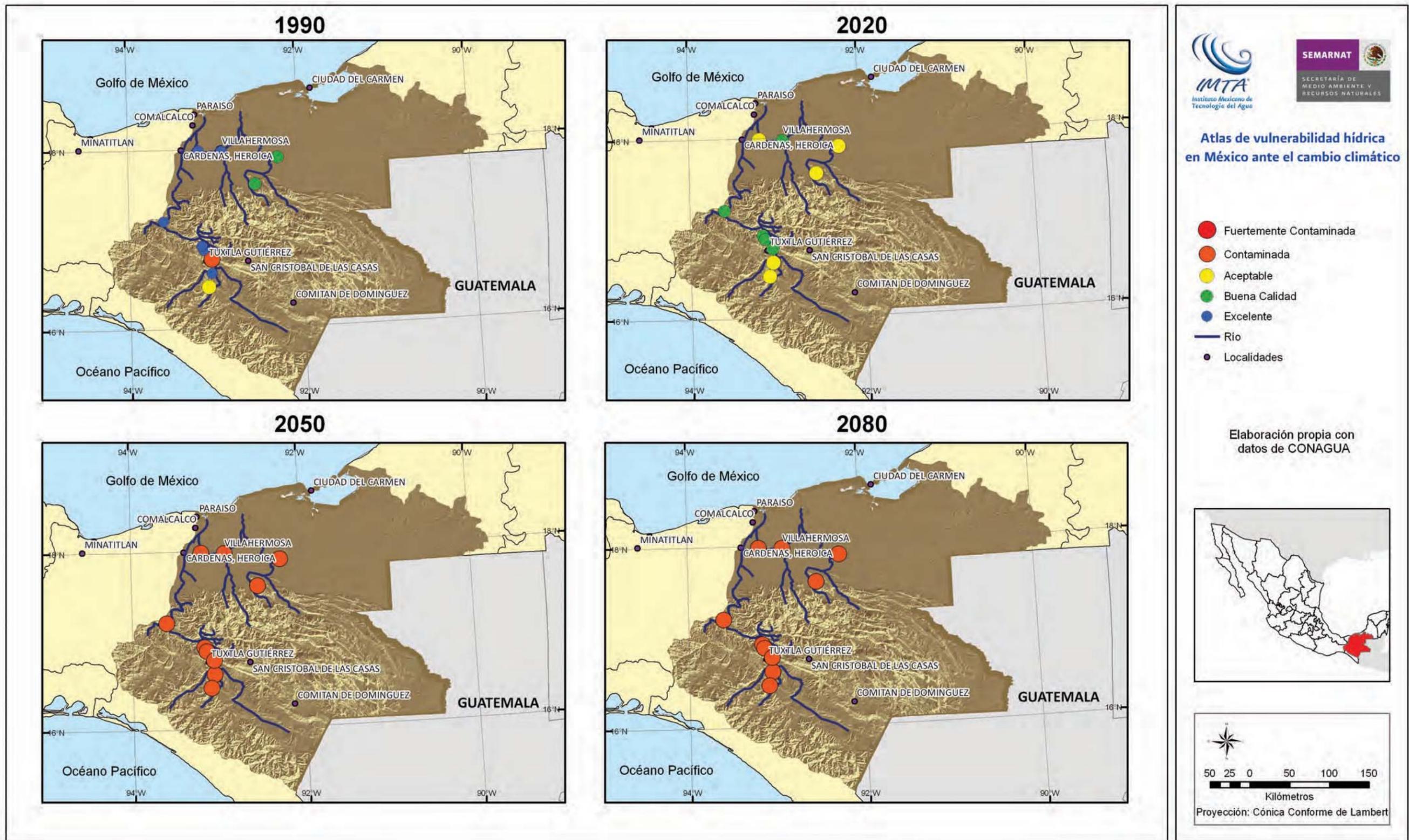
Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático

- Fuertemente Contaminada
- Contaminada
- Aceptable
- Buena Calidad
- Excelente
- Río
- Localidades

Elaboración propia con datos de CONAGUA







## Conclusiones y recomendaciones

La metodología desarrollada para la evaluación del impacto del cambio climático sobre los indicadores de calidad del agua  $DBO_5$ , DQO, es una herramienta útil y fácil de implementar, ya que las entradas de información de los diferentes parámetros son sencillas de utilizar, se adaptan a los requerimientos de los usuarios y además son flexibles con la información encontrada en las diferentes bases de datos de calidad del agua. Los resultados obtenidos sugieren el desarrollo de políticas y medidas de adaptación a corto plazo para atenuar los impactos esperados en las cuencas en estudio y de esta manera alcanzar niveles razonables de sustentabilidad en el uso del agua.

Una limitante importante en el estudio del efecto del cambio climático sobre la calidad del agua es la falta de datos. En este sentido, nuestro país requiere generar mayor cantidad de datos de calidad del agua, del clima e hidrología que permitan realizar un estudio con un mayor número de variables involucradas.

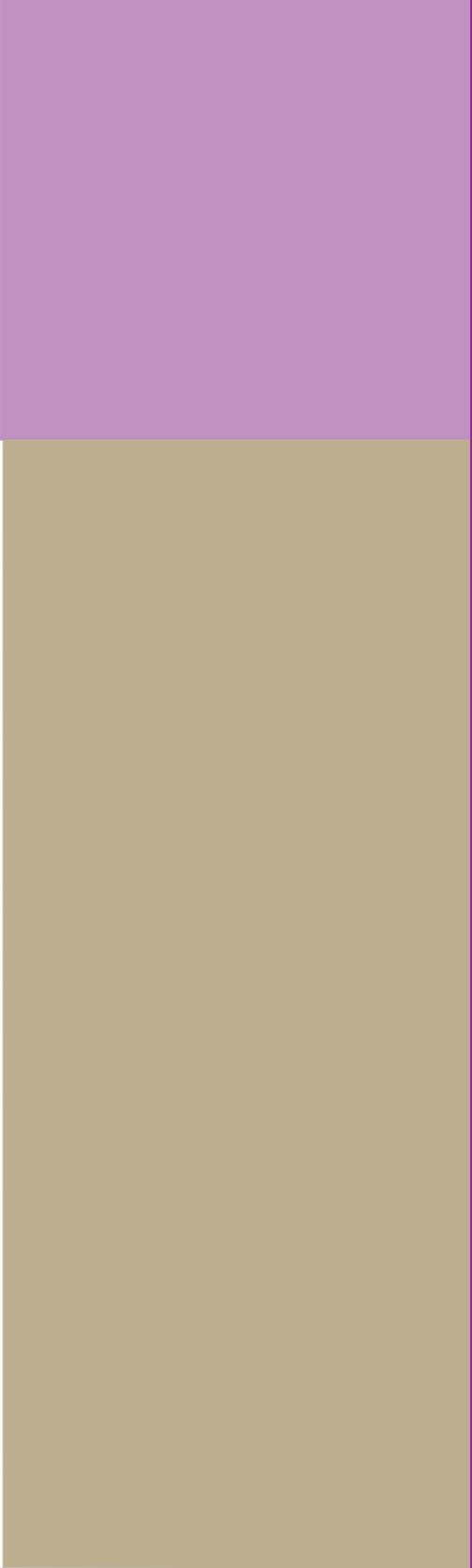
## Referencias

- CONAGUA (2010). Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 2010.
- Eckenfelder W. W., Jr. (1970). *Water Quality Engineering for Practicing Engineers*. Barnes & Noble, New York.
- Feijóo, C. S., Giorgi, A., García, M. E., & Momo, F. (1999). Temporal and spatial variability in streams of a pampean basin. *Hidrobiología*, 394: 41–52.
- IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) (2007). *Climate Change. Summary for policy makers*. Geneva, Switzerland, 2007.
- Martínez, P., Aguilar, A. (2008). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México (vol. II)*. Primera edición. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Morrill J.C., Bales R.C. and Conklin M.H. (2005). Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality. *Journal of Environmental Engineering* 131, 139-146.

- Praskievicz S. and Chang H. (2009). A review of hydrological modeling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography* 33, 5: 650–671.
- Santer B.D., Taylor K.E., Gleckler P.J., Bonfils C., Barnett T.P., Pierce D.W., Wigley T.M.L., Mears C., Wentz F.J., Brüggemanne W., Gillett N.P., Kleins A.A., Solomon S., Stott P.A. and Wehner M.F. (2009). Incorporating model quality information in climate change detection and attribution studies. *PNAS* 106, 35: 14778–14783.
- Schroepfer, G.S. (1964). *Advances in Water Pollution Control*, Vol. 2. Pergamon, Oxford.
- Whitehead, P.G., Wilby, R.L., Battarbee, R.W., Kernan, M. and Wade, A.J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal* 54: 101–123.

## Agradecimientos

Al M. en C. Alberto Balancán Soberanis por su apoyo en la elaboración de los mapas, a la Biól. Ivette Reza García y al Ing. Iván Zazueta Acosta, por su apoyo en la coordinación general del documento.



[www.imta.gob.mx](http://www.imta.gob.mx)

