

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

| | |
|-----------------------------|---|
| <i>Título</i> | Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. |
| <i>Autor / Adscripción</i> | <p>Ignacio Sánchez Cohen Gabriel Díaz Padilla</p> <p>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México</p> <p>Waldo Ojeda Bustamante Instituto Mexicano de Tecnología del Agua</p> <p>Ghani Chebhouni Instituto de Investigación por Cooperación, Francia</p> <p>Ignacio Orona Castillo Universidad Juárez del Estado de Durango, México</p> <p>José Villanueva Díaz José Luis González Barrios Guillermo González Cervantes</p> <p>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México</p> |
| <i>Publicación</i> | Ingeniería Hidráulica en México, 23(4): 5-24 |
| <i>Fecha de publicación</i> | 2008 |
| <i>Resumen</i> | Bajo la tendencia actual, a corto plazo se espera un acelerado incremento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Para correlacionar el cambio del clima con distintos impactos terrestres, en este trabajo se parte de una descripción del balance de energía, enfatizando la importancia de la presencia de GEI en la atmósfera. Las consecuencias del cambio climático son cuantificadas en términos de anomalías de precipitación, disponibilidad de agua y disminución en la producción agrícola de acuerdo con modelos de simulación biológica de procesos bajo diferentes escenarios de producción de gases de efecto invernadero. |
| <i>Identificador</i> | http://hdl.handle.net/123456789/1279 |

Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos

Ignacio Sánchez-Cohen
Gabriel Díaz-Padilla

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Waldo Ojeda-Bustamante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Ghani Chebhouni

Instituto de Investigación por Cooperación, Francia

Ignacio Orona-Castillo

Universidad Juárez del Estado de Durango, México

José Villanueva-Díaz
José Luis González-Barrios
Guillermo González-Cervantes

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

El grado de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) está ligado al desarrollo socioeconómico de las naciones acorde con sus esquemas productivos. Bajo la tendencia actual, a corto plazo se espera un acelerado incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Para correlacionar el cambio del clima con distintos impactos terrestres, en este trabajo se parte de una descripción del balance de energía, enfatizando la importancia de la presencia de GEI en la atmósfera. Los resultados indican que la agricultura en México ha sufrido impactos negativos de este proceso, en términos de incertidumbre climática, y ha causado, junto con otros factores, la emigración del campo de miles de personas. Las consecuencias del cambio climático son cuantificadas en términos de anomalías de precipitación, disponibilidad de agua y disminución en la producción agrícola de acuerdo con modelos de simulación biológica de procesos bajo diferentes escenarios de producción de gases de efecto invernadero. Se concluye con una propuesta de mecanismos de acción y preguntas por responder mediante el desarrollo de investigación.

Palabras clave: cambio climático, impactos climáticos, migración rural, agricultura de temporal, zonas de riego, efecto invernadero.

Introducción

La ocurrencia de eventos extremos, como huracanes, sequías intensas y prolongadas, derretimiento de

glaciares, etcétera, han alertado a los distintos gobiernos del mundo sobre la urgencia de reducir la producción de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera. Existe consenso científico en cuanto a que un incremento

en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) podría alterar los patrones globales de la precipitación y la temperatura. Así, en los pasados dos siglos, la concentración de CO₂ se ha duplicado, hasta los niveles actuales, cercanos a 400 partes por millón (ppm). Las industrias que utilizan carbón, derivados del petróleo y gases naturales extraen anualmente siete mil millones de toneladas de carbón, que en su mayor parte son incorporados a la atmósfera (Barnola *et al.*, 2003). El cambio climático global, relacionado con un incremento en la temperatura superficial de la Tierra, es considerado como el mayor reto ambiental del presente siglo.

La producción de gases está fuertemente ligada con el crecimiento de las economías mundiales; así, durante los pasados treinta años, el producto interno bruto (PIB) de bienes y servicios en el mundo creció a una tasa de 3.0% anual y las emisiones de carbono a una tasa de 1.5%. Dado que la tendencia de los indicadores económicos mundiales apuntan hacia un crecimiento, con tasas diferenciales acordes con el desarrollo de los países, la única alternativa para mantener bajos los niveles de emisiones atmosféricas es aumentando la eficiencia en el uso de combustibles fósiles en los procesos de producción y transformación de bienes y servicios, así como incrementando el uso de combustibles alternativos menos contaminantes.

Antecedentes y objetivos

El objetivo del presente documento es proveer de información y métodos base de análisis sobre la evolución, perspectivas e impacto del cambio climático en México, a través de variables socioeconómicas y de disponibilidad de agua para los diferentes usos consuntivos.

Se parte de la hipótesis de que la variación climática ha impactado en diferentes sectores productivos, especialmente en el rural, donde se ha incrementado el flujo migratorio interregional, interestatal e internacional. La emigración rural ha sido una estrategia usada por los productores rurales para mitigar los efectos climáticos adversos en sus actividades primarias (Conde *et al.*, 2006). El factor climático no es la única causal de la emigración rural, sino que forma parte de una intrincada correlación de variables de orden político, social y económico, además de ecológico. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2005) reportó que el 50% de las emigraciones hacia los Estados Unidos se da por causas laborales y familiares; el 76% de estas emigraciones es de ciudadanos de 15 a 34 años de edad (59.4% hombres y 40.6% mujeres), quienes representan la fuerza laboral efectiva para un país; desafortunadamente, 83.4% de tales ciudadanos no regresa a su lugar de

origen. Como ha sido reportado por varios investigadores (Kates, 1985; Kaperson *et al.*, 1995), la vulnerabilidad no es una condición exclusivamente climática, sino de interacción entre clima y sociedad.

También, según la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol, 2004), de los 8.2 millones de mexicanos que trabajan en el campo, la mayoría vive en pobreza extrema, y dos de cada tres personas son indigentes. En 1992, el 35.6% de la población rural sufría de insuficiencia en abasto de alimentos y en los últimos años ha pasado al 52.4%. En 1992, el 41.8% estaba en pobreza de capacidades; actualmente se estima el 50%. La pobreza expulsa a la población rural hacia las ciudades y a los Estados Unidos, con un promedio diario de seiscientas personas que abandonan su lugar de origen. El campo ha perdido un millón 780 mil empleos desde que entró en vigor el Tratado de Libre Comercio. Los trabajadores emigrantes representan un factor de seguridad del país, ya que son el sostén económico de sus familias y de las regiones de origen mediante el envío de remesas, que en el año de 2006 representaron 23 054 millones de dólares, el equivalente al 60% de las exportaciones de petróleo crudo (Banco de México, 2007). Se estima que 11 millones de mexicanos residen en el extranjero y casi el 98% de ellos en los Estados Unidos.

Tratándose de aspectos políticos, la reforma al artículo 27 constitucional de México derogó las normas que contenían la esencia de la tierra como propiedad social. Esta reforma establece que la parcela es un bien embargable, por lo que la familia campesina puede perder la tierra. También es permitido que los terrenos de propiedad social puedan ser arrendados. Asimismo, las reformas a la legislación abrieron la posibilidad de la compra y venta de tierra. La intrasmisibilidad impedía legalmente que los derechos sobre la parcela ejidal y el aprovechamiento de la misma fuesen cedidos a personas ajenas a la familia del propietario (Esparza, 1996). Este aspecto, aunado a la fragmentación de la propiedad rural, ha impulsado la emigración de la población.

Considerando que el clima es una variable de impacto en diferentes órdenes de magnitud, es necesario entender su efecto en las actividades productivas y las implicaciones en el contexto de la incertidumbre climática; para esto, el punto esencial de partida es el análisis del balance de energía en la atmósfera.

El balance de energía

La incertidumbre climática, espacial y temporal es el primer efecto del cambio global climático. Esta incertidumbre puede definirse como la incapacidad de predecir, con cierta precisión, el comportamiento de

variables climáticas como la precipitación y temperatura, lo que ubica a los sectores productivos, principalmente la agricultura, en la categoría de alto impacto y riesgo. El efecto de esta incertidumbre afecta principalmente a los sectores más vulnerables vinculados con la pobreza extrema (Sánchez-Cohen, 2005). Por otro lado, el cambio global se refiere a las alteraciones en los patrones generales del clima que generan cambios en variables atmosféricas. Si bien estas alteraciones son normales en la climatología terrestre, el problema estriba en la rapidez con que estos cambios se están suscitando en los últimos años, sin dar tiempo a los seres vivos de adecuarse en consecuencia (Prager y Earle, 2001). Para poder correlacionar objetivamente los impactos de la variabilidad climática con las actividades productivas, es necesario vincular estos impactos con el balance de energía.

Aunque la temperatura promedio en cualquier parte de la Tierra presenta variaciones interanuales y estacionales naturales, la temperatura promedio global permanece poco alterada; dado que existe un equilibrio energético global, se emite al espacio tanta energía como la que se recibe del Sol; se presenta un balance de energía entre la superficie de la Tierra y la atmósfera; es decir, cada año la superficie de la Tierra debe regresar a la atmósfera la misma cantidad de energía que absorbe (Ahrens, 1988; Sellers, 1975).

Una parte importante en el balance es la cantidad de radiación que es reflejada por diferentes gases en longitudes de onda largas (infrarrojo). Los llamados gases de efecto invernadero (GEI), incluidos el vapor de agua, dióxido de carbono y metano, son esenciales para el mantenimiento de la vida en la superficie del planeta, ya que evitan que la radiación solar recibida por la superficie terrestre se regrese al espacio, lo que mantiene al mundo "habitabile"; el problema radica en que las cantidades presentes de estos gases se ha incrementado de manera alarmante en los últimos años, propiciando incrementos anómalos en temperatura, afectando diversos procesos físicos y bióticos. Este efecto de invernadero ha sido benéfico para la humanidad por cientos de años, al retener de forma momentánea en la atmósfera el calor liberado por la superficie terrestre. Masera (2006) menciona que el efecto invernadero generado por los gases presentes en la atmósfera permite tener una temperatura de equilibrio de 13 °C, en lugar de -20 °C, si no existiera. Como se ha asentado, el problema radica en el gran incremento en la producción de GEI en el último siglo, que ha incrementado la temperatura de equilibrio, afectando una gran cantidad de procesos hidrológicos y biológicos.

Se puede establecer entonces que en el balance energético, la absorción y refracción hacia la Tierra de la radiación de onda larga es de suma importancia en el balance hidrológico. Este hecho ha sido reconocido y plasmado en acuerdos internacionales para la disminución de emisiones de gases a la atmósfera (IPCC, 2001).

El principal responsable del calentamiento global es el CO₂, además del metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los llamados flúor cloro carbonos (CF's); al conjunto de estos últimos se les conoce como "gases traza" debido a las concentraciones pequeñas (en relación con los otros gases) que existe de ellos en la atmósfera. El CO₂ y el vapor de agua absorben gran parte de la energía que la Tierra reemite al espacio (radiación de onda larga o infrarroja), ganando energía cinética (energía necesaria para el movimiento), y provocando colisiones con moléculas vecinas como el oxígeno y el nitrógeno (que no absorben energía de onda larga). Estas colisiones incrementan la energía cinética del aire, lo que resulta en un incremento en su temperatura, calentando la atmósfera. Además, estos GEI también emiten radiación de onda larga; una porción es absorbida por la superficie de la Tierra, lo que propicia su calentamiento. A este proceso de calentamiento se le conoce como "efecto de invernadero" (por la característica del CO₂ y el vapor de agua): dejar pasar la radiación solar directa, absorber y re-emitir la radiación de onda larga.

Situación en emisión de gases

Estados Unidos de América (EUA) constituye el principal emisor de CO₂ a la atmósfera; tan sólo durante el año 2003 emitió 1 580 millones de toneladas de carbón, asimismo, este país ha emitido 86 mil millones de toneladas desde 1800. De hecho, sus emisiones son 28% mayores que aquel que ocupa el segundo lugar (China). Las emisiones de Estados Unidos disminuyeron de manera insensible (0.1%) durante 2003, pero se han duplicado desde 1950. Los efectos de los precios del petróleo en los años setenta tuvieron un efecto significativo en las emisiones durante los inicios de los ochenta.

Aportación de México al efecto de invernadero

En el ámbito global, México se ubica en el décimo primer lugar en emisiones de gases a la atmósfera y en el primer lugar de América Latina. Acorde con Marland *et al.* (2005), las emisiones de CO₂ en México crecieron exponencialmente a una tasa de 6.5% por año desde 1891 hasta 1982. A partir de 1983 y hasta 1989, los

niveles de las emisiones permanecieron relativamente estables, previo a un fuerte incremento en 1989 y 1990. A partir de 1990, las emisiones han permanecido estables, ubicándose en 114 millones de toneladas de carbono.

El crecimiento de las emisiones en México se ha debido a un incremento en la producción de petróleo; así, en 2003, 66.5% de las emisiones fue por productos derivados del petróleo, lo que constituyó la más grande fracción de los principales países emisores de CO₂. Las emisiones anuales de CO₂ per cápita son de 1.01 toneladas de carbón, lo que lo ubica ligeramente por debajo del promedio global. El impacto de los precios del petróleo hacia finales de los setenta y principios de los ochenta se reflejó en un decremento del 80% en las emisiones de gas después de 1982. El consumo de gas natural en México ha crecido en importancia, siendo la fuente del 23% de las emisiones de combustibles fósiles (véase ilustración 1a).

Cambio climático y variabilidad climática

La estrecha correlación entre los gases de invernadero y el impacto en variables climáticas como temperatura y precipitación está sustentada en principios postulados por la ciencia a partir del siglo XIX. Así, la mayoría de los modelos matemáticos creados para predecir cambios

futuros en patrones climáticos muestran que si se duplica la cantidad de CO₂ en la atmósfera, éste provocará un incremento global en temperatura entre 2 y 5 °C; acorde con la tasa de incremento de este gas, esto ocurriría entre los años 2030 y 2060 (Stern, 2006). La ilustración 2 muestra la relación entre variables atmosféricas que promueven el cambio en el clima. Es de notarse el impacto en la variabilidad en patrones de precipitación que afectan de manera directa los procesos productivos, principalmente en la agricultura.

La variabilidad climática genera incertidumbre en un sistema, aumentando su riesgo. El riesgo puede ser físico o económico sin ser ambos necesariamente excluyentes. Dado que la atmósfera es un sistema dinámico no lineal, en el sentido determinístico no es fácil predecir su comportamiento, de aquí que los métodos estadísticos sean de utilidad en el proceso de determinar el comportamiento futuro de las variables climatológicas que impactan a los ecosistemas (Cohessen y Covello, 1989; Abbaspaur, 1992; Sánchez-Cohen, 2005; Wilks, 1995).

Para tipificar la variabilidad climática en términos de sequía se han propuesto diversos métodos, entre los que destacan el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Palmer, 1965) y el Índice Estandarizado de Precipitación (McKee *et al.*, 1993). Castillo (1988) hace

Ilustración 1. Aportaciones de gases a la atmósfera de México (a) y Estados Unidos de América (b) (datos base de Marlan y Borden, 2005).

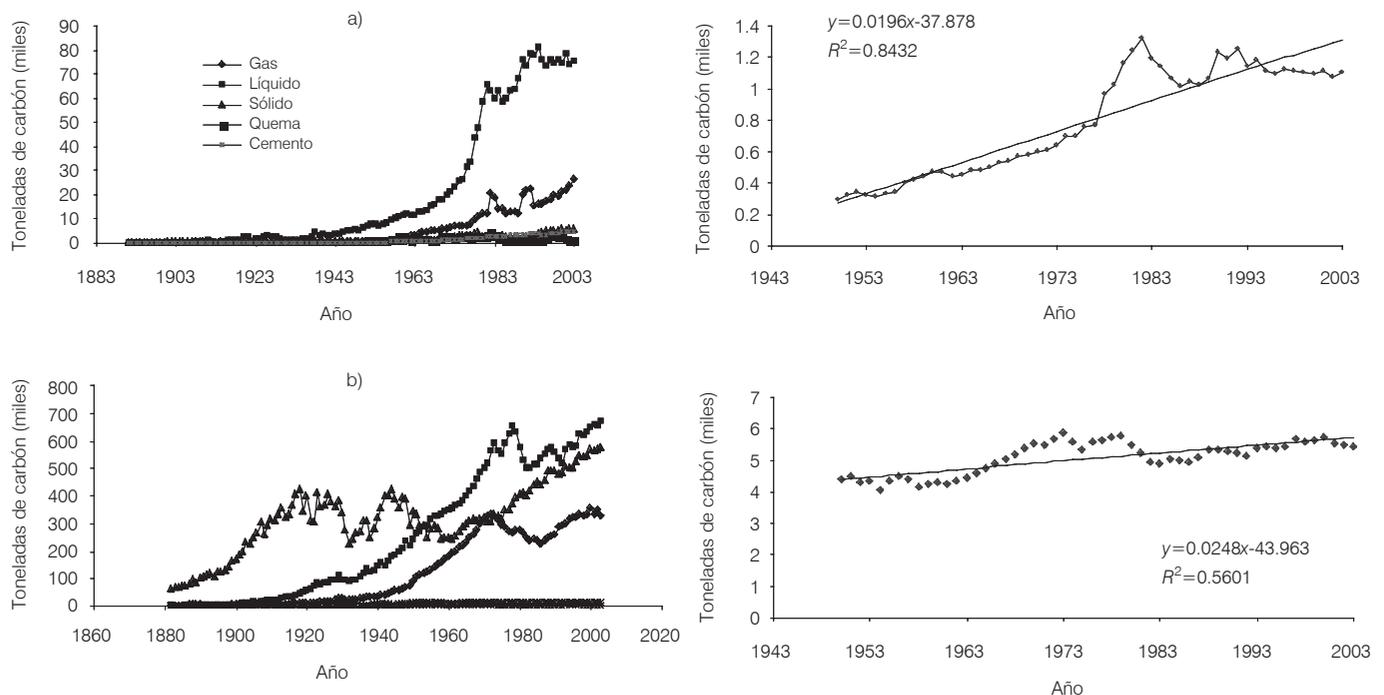
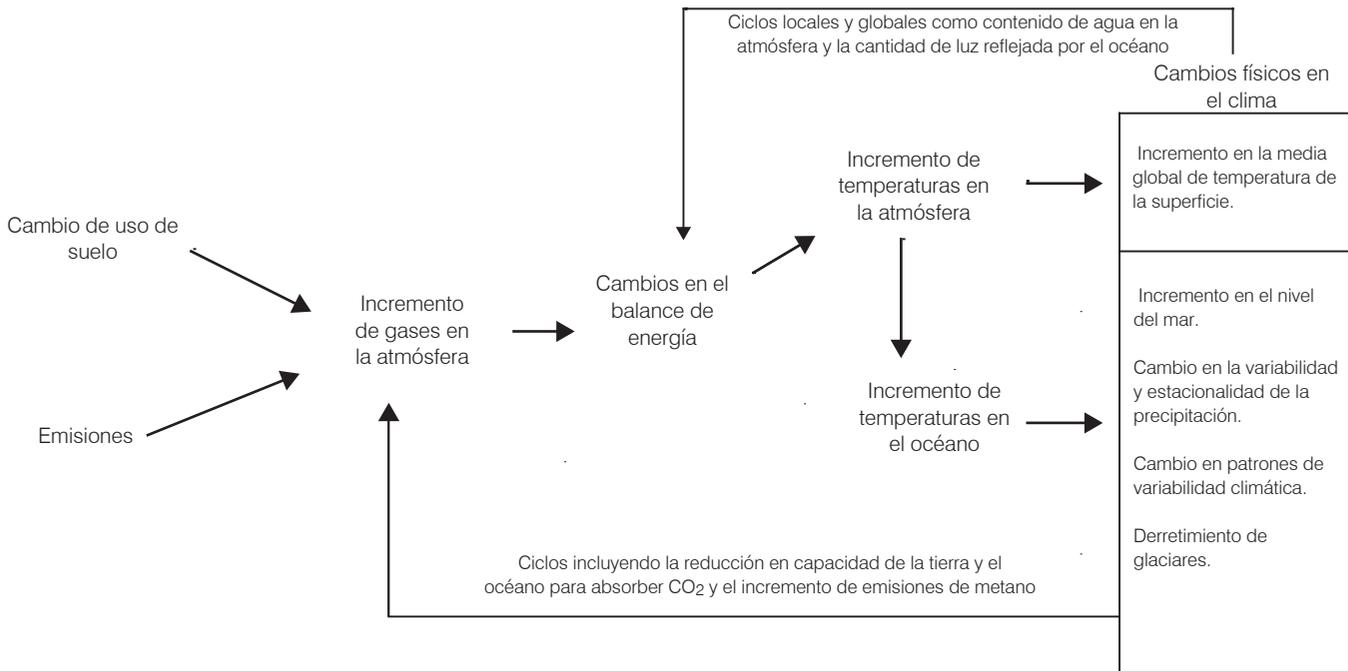


Ilustración 2. Interacción de variables en la atmósfera que impactan el cambio global en patrones climáticos (adaptado de Stern, 2006).



una detallada revisión de diferentes métodos empleados para la evaluación de sequía.

El Índice de Severidad de Palmer (PSDI o ISP por sus siglas en inglés y español, respectivamente) presenta un significado más “hidrológico-agronómico” que otros índices, en virtud de que no sólo considera la variabilidad de la precipitación en el tiempo, sino que además emplea la temperatura y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, lo que es fundamental en el balance de humedad del que depende la productividad de los cultivos. El ISP parte del análisis del balance entre precipitación (PP) y evapotranspiración potencial (ETP) (PP-ETP); cuando esta relación es negativa, es decir, cuando ETP es mayor que PP, se genera un déficit de humedad, lo que impide recarga de agua en el suelo y producción de escurrimiento; por otro lado, cuando la PP es mayor que ETP, se pueden generar dos condiciones: que el superávit de humedad cubra sólo las necesidades de ETP y recarga de humedad del suelo sin producción de escurrimiento, o que además de que se cubran las necesidades de ETP, haya suficiente humedad para saturar el suelo y se produzca escurrimiento (Rivera, 2005).

Por otro lado, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI o ISP por sus siglas en inglés y español, respectivamente) se fundamenta en los datos históricos de precipitación para algún periodo de tiempo deseado. En el proceso de cálculo del ISP, este periodo se ajusta

a una función probabilística de densidad, la cual, a su vez, es transformada a una distribución normal, de tal manera que el valor medio de SPI para una localidad y periodo es cero (Edwards y McKee, 1997). De esta manera, los valores positivos de ISP son indicativos de valores de precipitación mayores a la media y valores negativos indican lo opuesto. En este índice se dice que una sequía ha ocurrido cuando existen valores negativos de manera continua, con una intensidad de -1.0 o menor; el periodo seco termina cuando el valor de ISP se hace positivo.

Como se ha asentado, las anomalías climáticas, en la forma de anomalías estandarizadas en un contexto operacional, evalúan objetivamente el comportamiento del clima en términos de estabilidad o incertidumbre. La ecuación 1 se utiliza para la cuantificación del ISP:

$$ISP = \frac{(x_i - \bar{x})}{S_x} \quad (1)$$

Donde S_x y \bar{x} son la desviación estándar y la media de los valores de la variable de interés x para un tiempo dado, respectivamente.

Las anomalías estacionales de precipitación por región en el país presentan gran variabilidad

espacial; así, la ilustración 3 muestra estas anomalías en un gradiente de norte a sur para seis estaciones climatológicas. Es pertinente señalar que los puntos por encima de la media histórica (señalada como "0" en la escala vertical) indican periodos de precipitación total anual mayores al promedio (las unidades son números de desviaciones estándar) y los eventos por debajo de la media histórica significan periodos de baja disponibilidad de precipitación que, dependiendo de su magnitud y duración, pueden ser catalogados como sequías.

De las anomalías anuales calculadas se puede notar también la recurrencia y magnitud de los ciclos húmedos y secos; así, la presencia de años extraordinarios es menos frecuente en el norte que en el sur; sin embargo, la magnitud de éstos (altura de los picos) cuando se presentan es mayor en el norte que en el sur.

Al respecto, realizando una modelación estocástica de eventos extremos, Tiscareño (2006) señala que la frecuencia de eventos extremos como ciclones será mayor en los estados del sureste del país, en donde los periodos de retorno concentrados en cinco meses

tienen un valor de dos años y medio, contrastando con los del norte, donde este valor oscilará entre tres y cinco años concentrados en tres meses (ilustración 4).

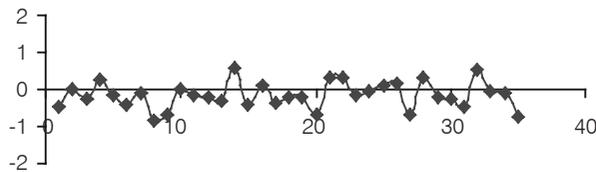
En una perspectiva al año 2025, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el Consejo Nacional de Población (Conapo, 2000) reportan que seis regiones críticas, de las 13 regiones administrativas en las que la Conagua divide al país, padecerán una escasez de disponibilidad de agua baja (regiones II, IV y IX) y extremadamente baja (regiones I, VI, y XIII). Las características hídricas de cada región se presentan en el cuadro 1. Las regiones críticas se localizan en las zonas áridas y semiáridas del norte del país y en la zona centro (Valle de México), con las mayores concentraciones de población y desarrollo industrial.

La variabilidad climática y socioeconomía

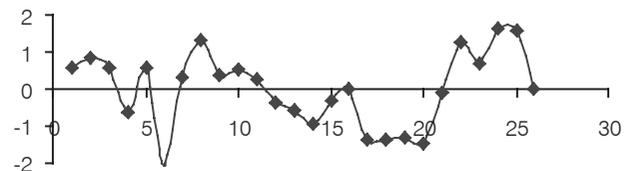
En México, el 23.5% de la población subsiste de actividades relacionadas con la agricultura de manera directa o indirecta. Esta población ha disminuido

Ilustración 3. Anomalías de la precipitación anual en algunas estaciones de la república mexicana obtenidas mediante la ecuación (1) (Sánchez-Cohen, 2005).

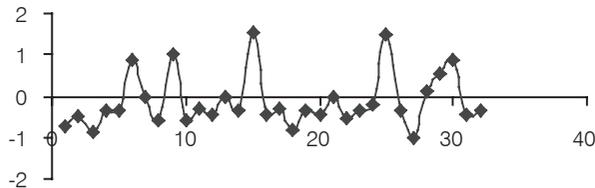
Todos Santos, B.C.S. (23° 26' latitud y 110° 13' longitud, 160 msnm, 35 años de registro)



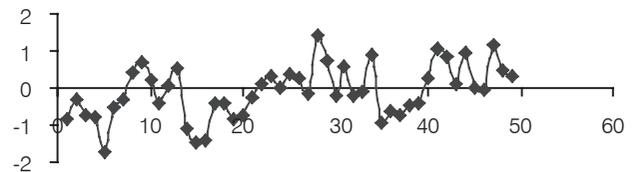
Presa Abelardo Rodríguez, Chis. (16° 20' latitud y 92° 12' longitud, 1 775 msnm, 26 años de registro)



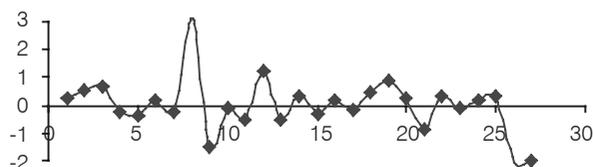
Mexicali, B.C. (32° 55' latitud y 115° 47' longitud, 3 msnm, 31 años de registro)



Candelaria, Camp. (18° 11' latitud y 91° 03' longitud, 25 msnm, 50 años de registro)



Bachiniva, Chih. (28° 48' latitud y 107° 15' longitud, 2 020 msnm, 27 años de registro)



Villahermosa, Tab. (17° 59' latitud y 92° 55' longitud, 10 msnm, 12 años de registro)

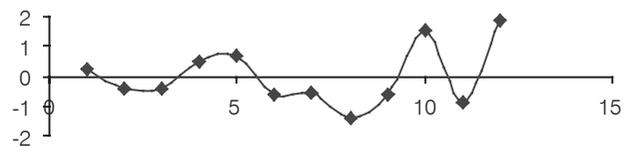
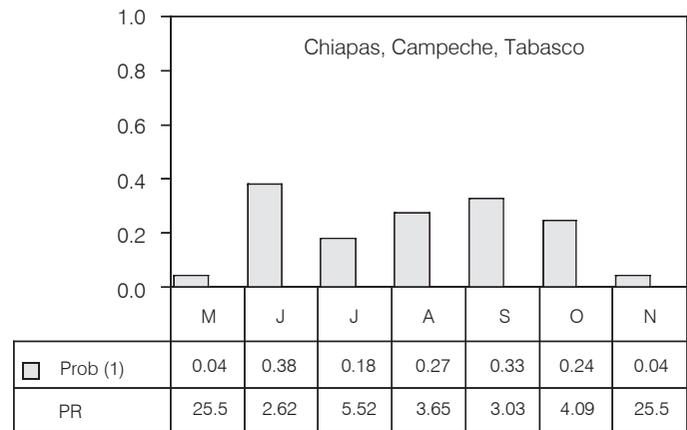
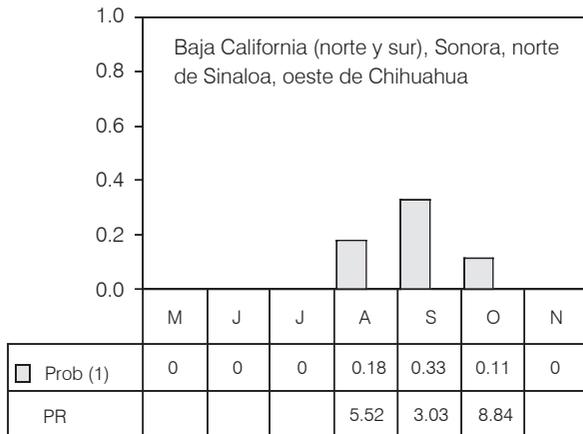


Ilustración 4. Probabilidades de huracanes y periodos de retorno para dos áreas contrastantes de la república mexicana (Tiscareño, 2006).



considerablemente en el tiempo, pasando del 57.4% en 1950 hasta el 23.5% en 2005, con una tasa de disminución anual de 3.3%; a este ritmo, la población rural descenderá a niveles cercanos a cero en los próximos 35 años.

Así, en el sector agropecuario, el 50% de las pérdidas se deben a sequías, el 23% a flujos extremos y el 27% a otras causas (Tiscareño, 2006). El sector agropecuario es el principal usuario del agua y del suelo. La agricultura de riego utiliza el 78% del agua extraída en el país y la ganadería el 2%; en cuanto al suelo, se cultivan alrededor de 23 millones de hectáreas; además, aproximadamente 112 millones se clasifican como de uso ganadero; casi el 70% del territorio nacional tiene un uso agropecuario (Conagua, 2006). Lo anterior pone de manifiesto la gran dependencia del bienestar social de la agricultura y ganadería, y a su vez el impacto de la disponibilidad del agua en el sector.

La ilustración 5 muestra una matriz de impactos ante la presencia de un evento extremo como sequía; el recuadro señala el sistema afectado (social) y la escala de mayor impacto (regional); así, la incertidumbre climática ha impulsado el cambio de actividad económica y el fenómeno de emigración de la población rural.

De acuerdo con recientes estimaciones sobre emigración para México, existen 22 millones de habitantes de origen mexicano en los Estados Unidos, lo que equivale al 8% de la población de ese país y al 22% de la de México; detrás de estos números se esconde una compleja interrelación de variables difíciles de cuantificar (Delgado y Ramírez, 2001). Sin embargo, las ciencias sociales se han encargado de estudiar estas relaciones, pudiendo agrupar las

causas de la emigración en dos factores esenciales: a) aquellos que empujan al emigrante a abandonar su lugar de origen y b) aquellos que atraen al emigrante a moverse a otra área (Bauder, 2006). Dentro de los primeros destacan el trabajo, la pobreza y los factores ambientales, entre los que se encuentra la sequía; en los segundos se ubican más y mejores servicios, estándar de vida, mejor clima y estabilidad económica. Es de notarse que en ambas categorías aparece el clima como causa preponderante de la emigración en varios países.

En este contexto y en relación con la emigración del medio rural en México, los estados que aportan el mayor número de emigrantes hacia los Estados Unidos en orden descendente y su respectivo índice de pobreza humana (IPH) (Palacios, 1997) son los siguientes: Zacatecas (8.2), Guanajuato (9.3), Michoacán (10.5), San Luis Potosí (12.1), Durango (6.1), Hidalgo (12.1), Jalisco (7.9), Oaxaca (18.3), Puebla (12.1), Veracruz (15.1) y México (11.6). De estos emigrantes, el 59.4% son hombres y el 40.6% mujeres (INEGI, 2005). Es pertinente recalcar que un IPH mayor a 9 se califica como severo, entre 5 y 9 se califica como moderada, y menor de 5, leve.

Método de aproximación

Se utilizó información y bases de datos de distintas fuentes para cuantificar los impactos de la variabilidad climática en México, los cuales se analizaron con tres enfoques esenciales:

- a) Hidrológico. Se llevó a cabo un análisis de bases de datos de clima, cuantificando la variabilidad climática y su correlación con la disponibilidad de agua

Cuadro 1. Perspectivas de disponibilidad de agua por región administrativa (datos fuente de Conagua, 2007).

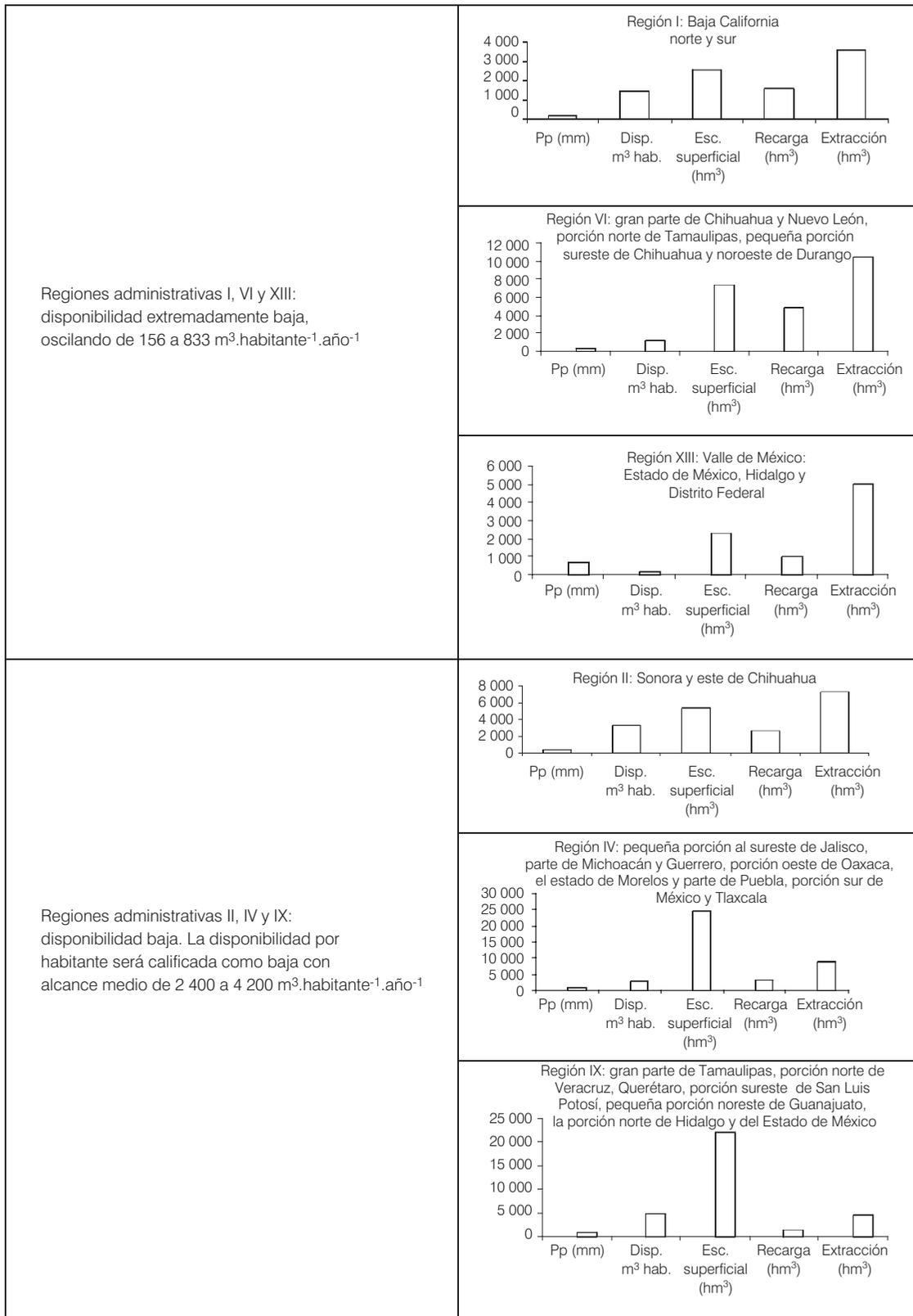
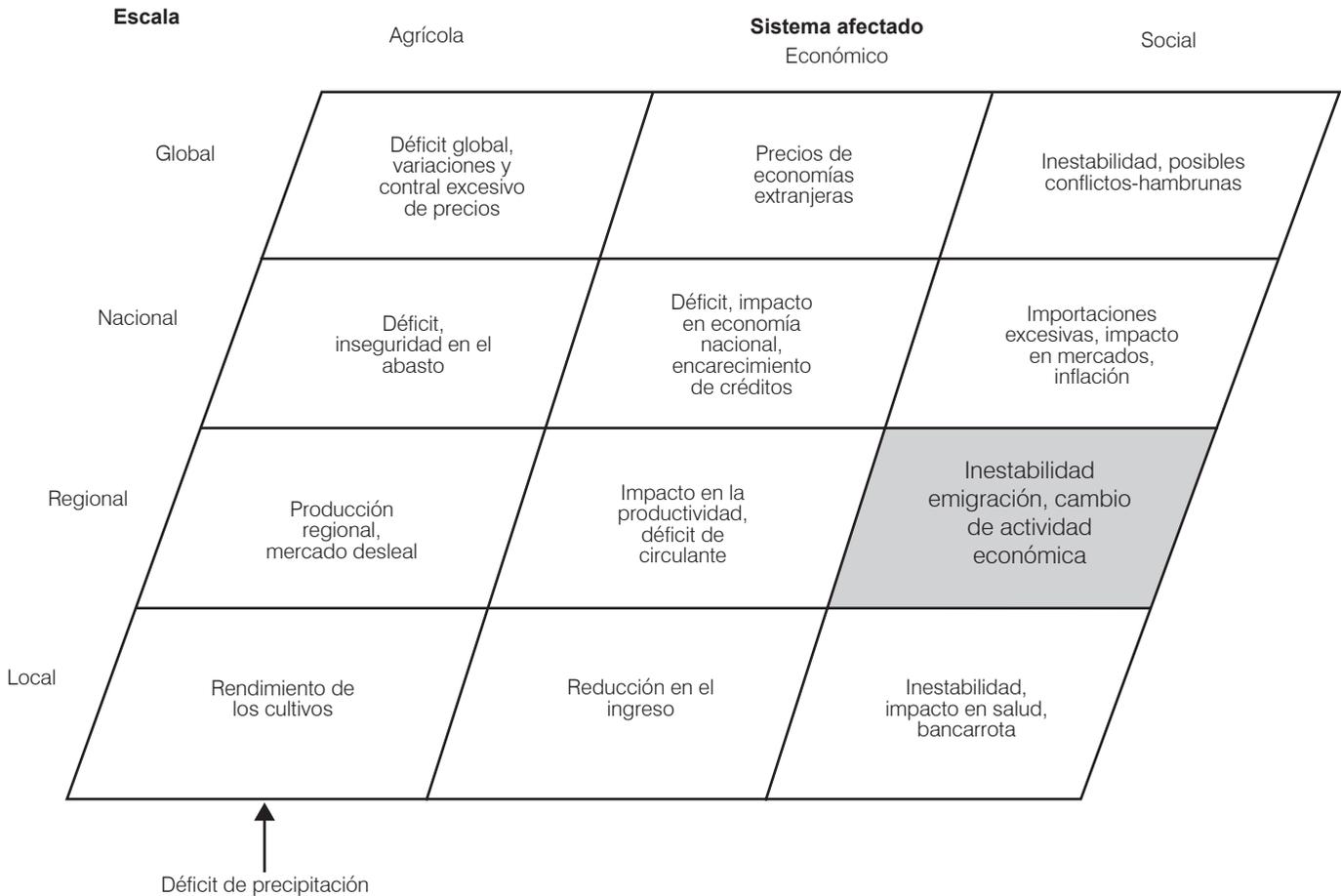


Ilustración 5. Matriz de impacto a diferentes escalas y sistemas afectados (Sánchez-Cohen, 2005, modificado de Warric y Bowden, 1981).



- b) Social-económico. Se hizo un análisis de la variabilidad climática en el país, dando énfasis en el sector más vulnerable, fuente de emigración a otros sectores productivos y al extranjero.
- c) Impactos potenciales. Se utilizaron bases de datos del Centro de Aplicación de Datos Socioeconómicos (SEDAC, por sus siglas en inglés), en términos del uso de modelos de simulación para predecir el comportamiento futuro de rendimientos de cultivos básicos en el país.

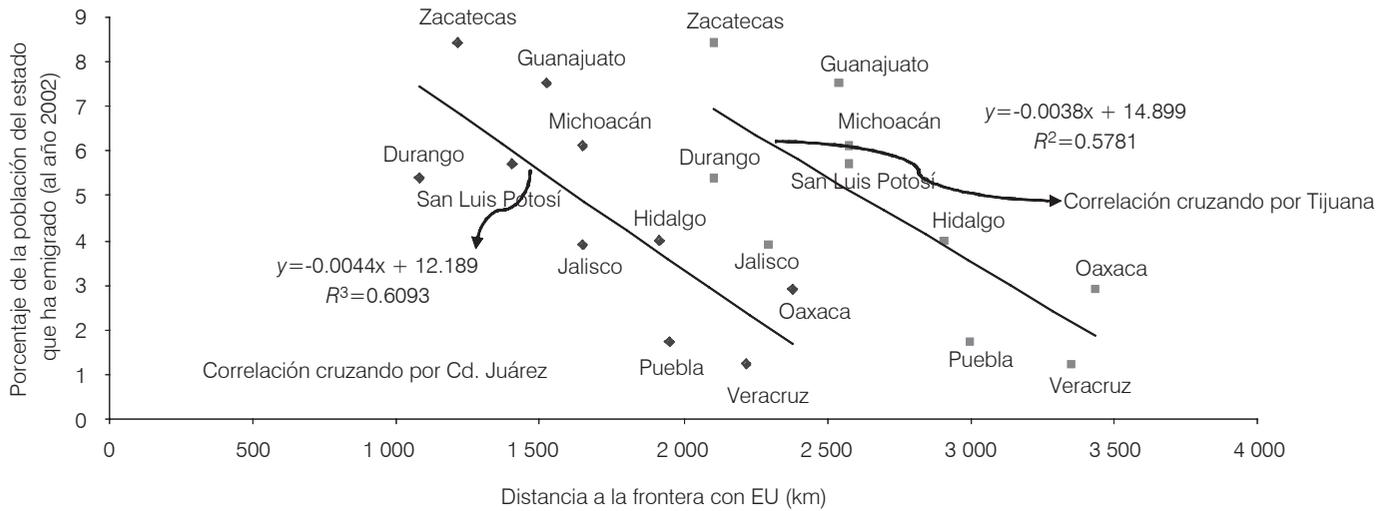
Resultados

La ilustración 6 presenta el porcentaje de la población estatal que ha emigrado con respecto a la distancia de dos puntos fronterizos de mayor flujo migratorio: Ciudad Juárez y Tijuana. Aunque California es el estado de los Estados Unidos que recibe el mayor número de migrantes mexicanos (26%), la cercanía de los estados

mexicanos con mayor tasa de emigración con la frontera de Tijuana explica el 57% de la misma. Sin embargo, la dependencia de estas variables se incrementa hasta un 60% cuando se correlaciona con la cercanía de los estados de origen a la frontera con Texas (que es el segundo estado con mayor recepción de emigrantes, 19%, seguido de Illinois con 5%). Así, en la ilustración 6 se puede apreciar que los principales estados que exportan población están ubicados entre los 1 000 y 1 700 km de la frontera con el estado de Texas, y entre los 2 100 y 2 500 km con el estado de California.

La característica común entre estas entidades es que dentro de sus actividades económicas destacan la agricultura y ganadería, por lo que la merma en precipitación pluvial ha afectado considerablemente su economía, dada la dependencia de la precipitación en agricultura de temporal y la merma en almacenamientos en las presas para agricultura de riego. La ilustración 7 muestra la relación de emigrantes y el clima, en donde

Ilustración 6. Tasa de emigración a los Estados Unidos, como función de la distancia a dos ciudades fronterizas: Ciudad Juárez, Chihuahua, y Tijuana, Baja California Norte.



se puede observar que estos estados se ubican bajo la influencia de climas áridos, semiáridos e hiperáridos. La clasificación climática se realizó cuantificando un índice de aridez (I_a) definido como (UNEP, 1992):

$$I_a = \frac{Pp}{Ev} \quad (2)$$

Donde Pp es la precipitación pluvial y Ev es la evaporación. Cuando este cociente es igual a la unidad, se asume que no existe déficit de humedad; a medida que I_a se reduce, el estrés se incrementa, al igual que el riesgo climático. El análisis se realizó en 2 800 estaciones climatológicas y posteriormente se interpoló para obtener el mapa que señala la porción inferior de la ilustración 6.

Los eventos climáticos separados en tiempos relativamente cortos tienden a estar correlacionados; así, el análisis de estas correlaciones son útiles en aras de entender los procesos climáticos y para estar en posición de hacer algunas predicciones. Acorde con Hutchinson (1990), un parámetro climático robusto para caracterizar alguna región es la duración del periodo seco (sin lluvia), el cual se puede determinar con datos estadísticos de precipitación pluvial. Este parámetro representa la variabilidad de la lluvia y está fuertemente asociado con la duración de los periodos secos en el corto y largo plazos.

El parámetro que representa la duración del periodo sin lluvia es la probabilidad condicional de que en un día determinado sin lluvia ($P_t = 0$) le seguirá otro día seco

($P_{t+1} = 0$); este parámetro se representa por " P_{ss} ". Siendo la precipitación una variable aleatoria discreta puede ser representada por un proceso estocástico, por lo que el uso de cadenas de Markov es apropiado. El esquema de cadenas de Markov se fundamenta en una colección de estados de un sistema; para el caso de estudio, el sistema es la precipitación pluvial en la que pueden ocurrir sólo cuatro estados, en donde, como se ha asentado, $X = 0$ si no ocurre lluvia y $X = 1$ si llueve; así, la matriz de transición de estos estados se representa como:

$$\begin{aligned} P_{ss} &= P_r(X_{t+1} = 0 | X_t = 0) \\ P_{sh} &= P_r(X_{t+1} = 1 | X_t = 0) \\ P_{hs} &= P_r(X_{t+1} = 0 | X_t = 1) \\ P_{hh} &= P_r(X_{t+1} = 1 | X_t = 1) \end{aligned} \quad (3)$$

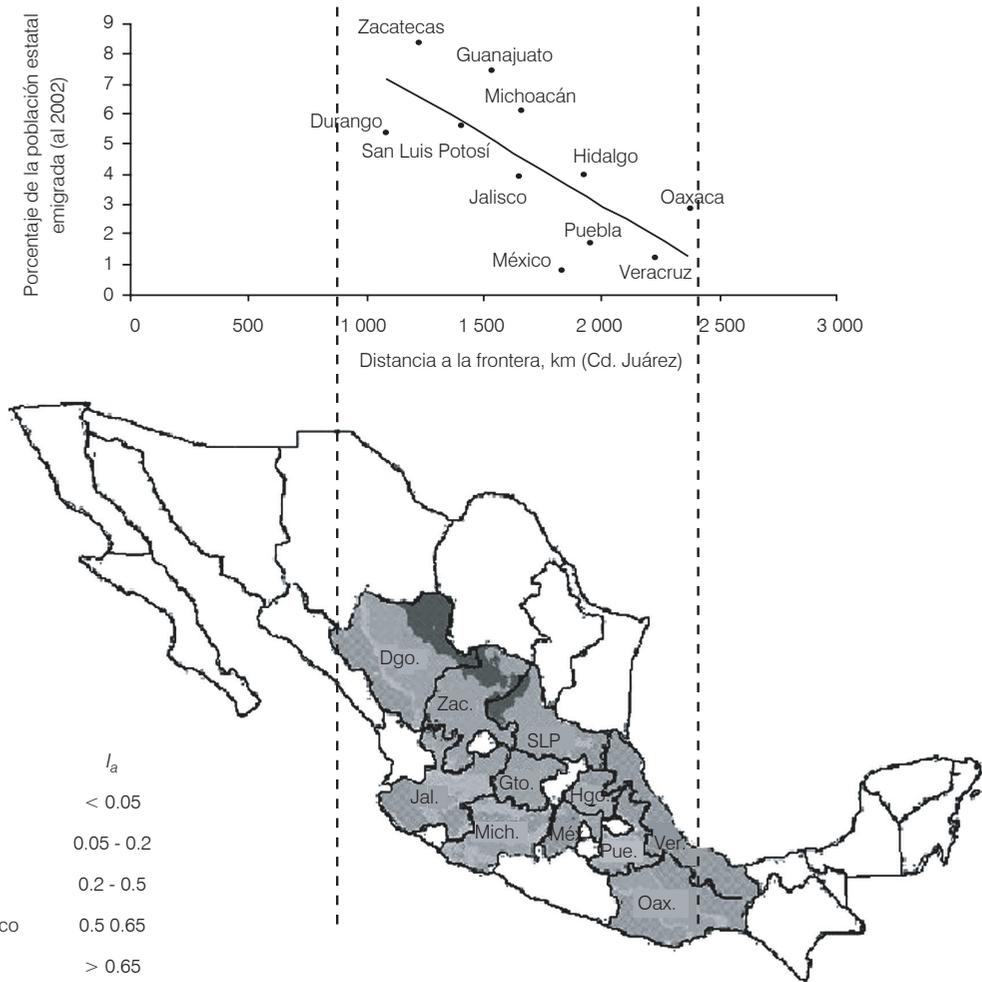
Donde P es la probabilidad condicional, s representa un día sin lluvia y h con lluvia.

De las transiciones que muestra la ecuación (2), se puede notar que $P_{ss} + P_{sh} = 1$ y $P_{hs} + P_{hh} = 1$. Con una base de datos de precipitación pluvial diaria, el cómputo de P_{ss} se realiza como:

$$P_{ss} = \frac{N(s/s)}{n(s)} \quad (4)$$

Donde $N(s/s)$ es el número de ceros precedidos de ceros y $n(s)$ es el número total de ceros (Sánchez-Cohen, 2005).

Ilustración 7. Relación entre clima y tasas de emigración de población rural en México.



El valor de P_{ss} se calculó para seis estaciones climatológicas localizadas en el área de influencia de zonas de agricultura de temporal para algunos de los estados de la república mexicana con mayor tasa de emigración, cuyas curvas de probabilidad se presentan en la ilustración 8 y se correlacionó con las superficies siniestradas, producto de la falta de precipitación para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos.

Por otro lado, la probabilidad condicional P_{hs} se utiliza en proceso de generación de cantidades de precipitación en modelos de simulación y constituye la base para el pronóstico del clima; así, este parámetro está estrechamente relacionado con las cantidades de precipitación que ocurren en un determinado lugar y tiempo. Dada la relación existente entre precipitación y productividad en zonas de temporal, este parámetro se correlacionó con el producto interno bruto agropecuario de los estados de la república mexicana mencionados

anteriormente, obteniéndose los resultados que se señalan en la ilustración 9.

De la ilustración 8 se puede apreciar la tendencia de incremento de la superficie siniestrada cuando el valor de P_{ss} se incrementa, es decir, cuando el año es seco; nótese la alta variabilidad de estos patrones, lo que implica la incertidumbre climática.

En relación con el parámetro P_{hs} y el PIB, en la ilustración 9 se puede observar que este último se explica por las variaciones en el primero, reafirmando que la agricultura en zonas de temporal es rehén del clima y esto, a su vez, explica las altas tasas de emigración de estas entidades hacia otros sectores productivos o al extranjero.

Para el caso de algunos distritos de riego en esos mismos estados, la ilustración 10 presenta la anomalía en volúmenes utilizados en distintos ciclos agrícolas (1997-1998 a 2003-2004). Estas anomalías fueron calculadas

mediante la ecuación (1) y reflejan las variaciones en precipitación, lo que impacta los escurrimientos a los embalses y, por consecuencia, los volúmenes entregados a los usuarios para los distintos ciclos agrícolas. Por ejemplo, la ilustración 11 presenta las anomalías de escurrimiento a la presa Lázaro Cárdenas del Distrito de Riego 017, vinculadas con las anomalías de volúmenes entregados a los usuarios de ese distrito de riego.

En términos del Índice Estandarizado de Precipitación, la ilustración 12 presenta la variación espacial de este valor, indicando los estados en donde se tuvo el mayor impacto de la escasez de precipitación para los años señalados.

Variabilidad climática y escenarios potenciales

Impactos potenciales

En el futuro cercano, el sector agropecuario estará sometido a severa presión por solventar el déficit de alimentos que aquejarán a la población en un ambiente de degradación de recursos naturales, principalmente el suelo, y ante una incertidumbre en la disponibilidad de agua para los procesos productivos, como consecuencia

de un acelerado incremento de gases en la atmósfera. Como se ha asentado, el cambio climático es la causa principal que afecta particularmente a los sectores poblacionales más vulnerables, cuya capacidad de sobrellevar el riesgo es mínima, con impactos serios en su estándar de vida.

El Centro de Datos Socioeconómicos y de Aplicación (SEDAC, por sus siglas en inglés) desarrolló un sistema para predecir los impactos potenciales del cambio climático en la disponibilidad de alimentos en varios países del mundo. Este sistema utiliza las “salidas” de tres modelos atmosféricos de circulación general (GCM) como “entradas” a modelos de simulación del crecimiento de cultivos de 125 regiones agrícolas del mundo, que representan una vasta proporción de países productores. Estos modelos dinámicos del crecimiento de cultivos simulan el efecto de variación de variables meteorológicas (temperatura, precipitación y radiación solar), modificaciones ambientales (incremento en CO₂) y prácticas del manejo del cultivo (fertilización, riego, etcétera) en la fisiología y el rendimiento de cultivos (Rosenzweig *et al.*, 1993).

En el estudio del SEDAC para los diferentes escenarios de evaluación, se asumieron tres niveles

Ilustración 8. Relación entre el parámetro P_{ss} y la superficie siniestrada en algunos estados de la república con mayor tasa de emigración del medio rural.

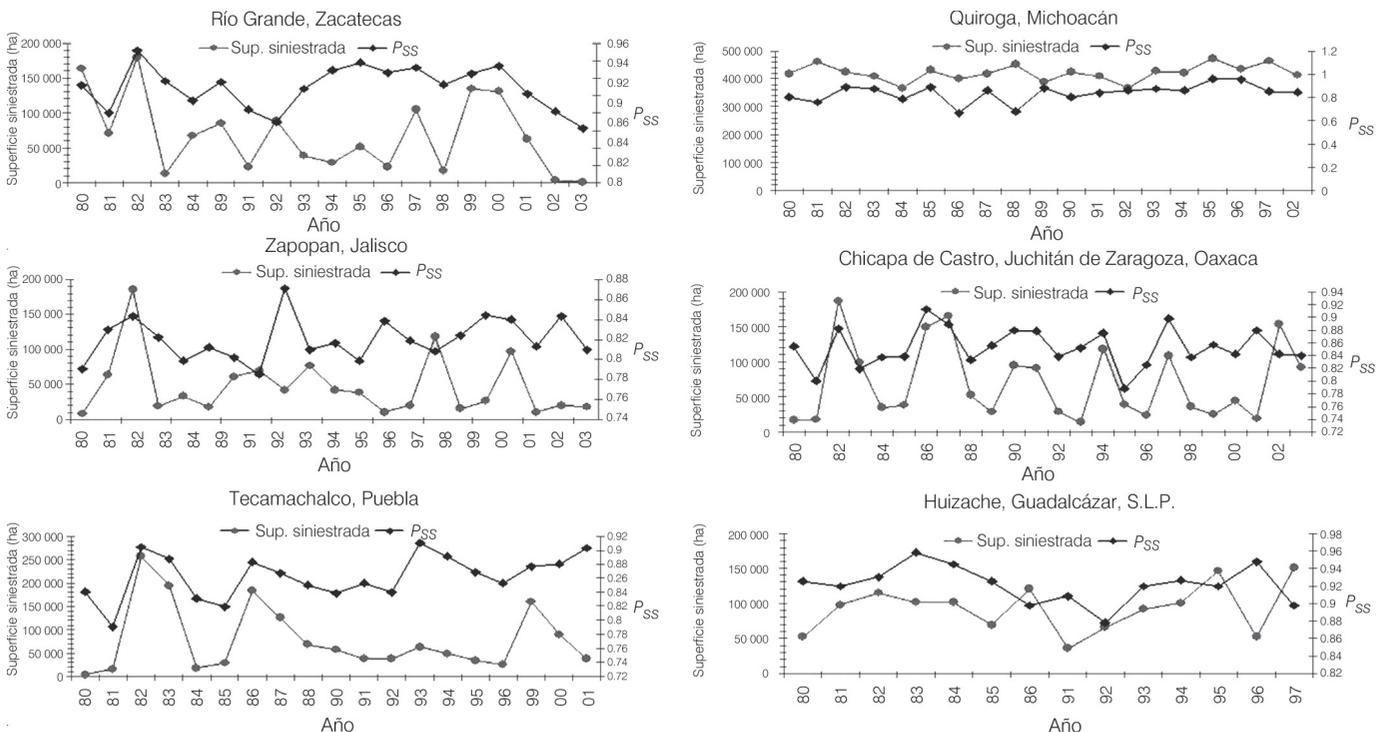
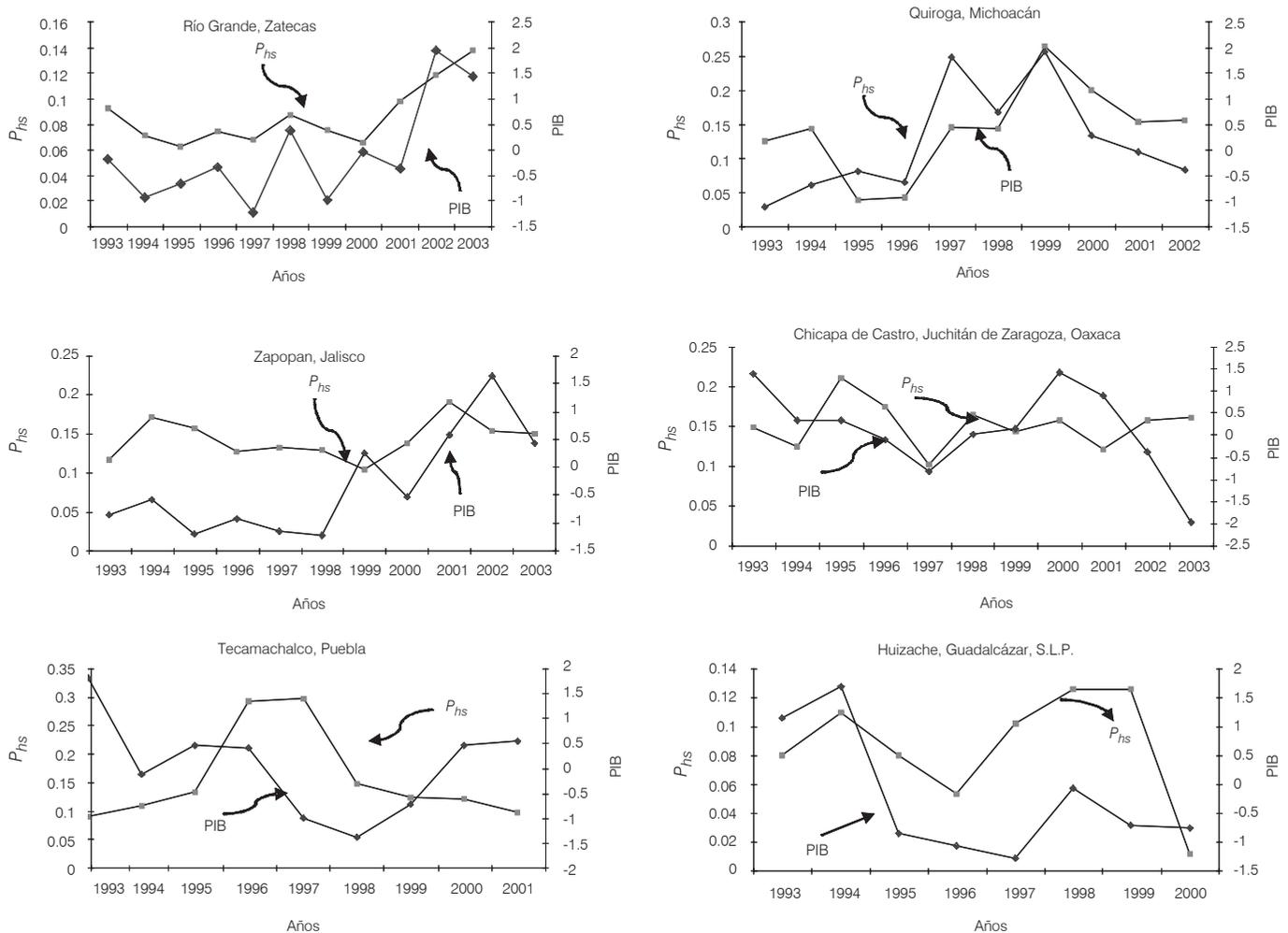


Ilustración 9. Relación entre la probabilidad condicional P_{hs} y el Producto Interno Bruto (normalizado) para algunos estados de la república con mayor tasa de emigración del medio rural.



de adaptación al cambio climático por parte de los productores:

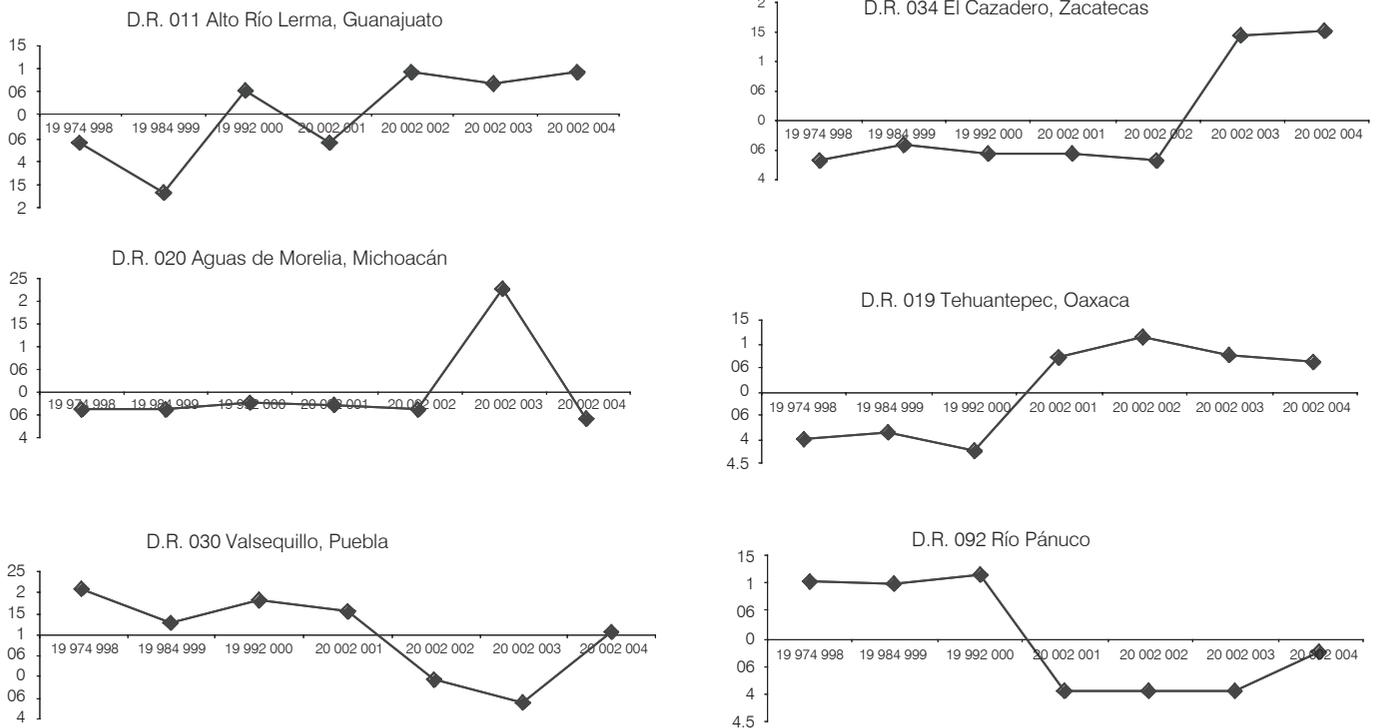
1. No adaptación (*business as usual*): en este escenario se asume que los productores no realizan actividad alguna en aras de adaptación a los estándares climáticos.
2. Nivel 1: cambios en fechas de siembra (menor a un mes), variedad y cultivo, e incrementos en cantidades de agua. Se asume que estos cambios tienen poco efecto en los costos de producción.
3. Nivel 2: cambio en fechas de siembra (mayor de un mes), incremento en la intensidad de producción, en la cantidad de fertilizantes, cambio de sistemas de riego y desarrollo de nuevas variedades. Estos cambios asumen un incremento considerable en los

costos de producción del productor. También asume la modificación en algunas políticas relacionadas con normatividad por parte de los gobiernos.

Los modelos se ejecutaron con la base de datos de clima generado por los modelos GCM para los diferentes niveles de adaptación descritos anteriormente, considerando los efectos potenciales con un incremento esperado en las concentraciones de gases de efecto invernadero; como referencia, se realizó un análisis sin considerar este efecto en incremento en los GEI. El cuadro 2 muestra los resultados de estas corridas para las condiciones de México.

Los escenarios fijos que señala el cuadro 2 se refieren a incrementos en la cantidad de CO_2 prefijados, pero se desconoce el tiempo en que éste ocurrirá; por otro

Ilustración 10. Anomalías en volúmenes utilizados en algunos distritos de riego de los estados con mayor tasa de emigración del medio rural.



lado, los escenarios variables preestablecen un año y se pronostica (acorde con los GCM) la cantidad de CO₂ que existirá en ese momento.

Los sitios en donde se ha colectado la información del SEDAC para la aplicación de los modelos de simulación en México se ubican en los valles centrales del país. De acuerdo con los resultados, todos los modelos pronostican una notable reducción en la producción de maíz, arroz y trigo en México. Esta reducción es más notoria en los escenarios de no adaptación. Los mecanismos de adaptación incluidos en la modelación de impacto son genéricos y asumen las condiciones necesarias para que se lleven a cabo; sin embargo, esto no es necesariamente el caso en muchos países, en donde la política agraria constituye baja prioridad en la agenda de desarrollo y se vincula más con importaciones u otros mecanismos de abasto.

Aunque numerosa literatura reporta los beneficios del incremento en las cantidades de CO₂, dado el proceso de fotosíntesis, el impacto del incremento de este gas en la atmósfera en términos de producción de cultivos a gran escala no estriba en su concentración per se, sino en el incremento en la temperatura que provoca este gas al impedir que la radiación de onda larga se

irradie de la Tierra a la atmósfera como parte de un adecuado balance de energía.

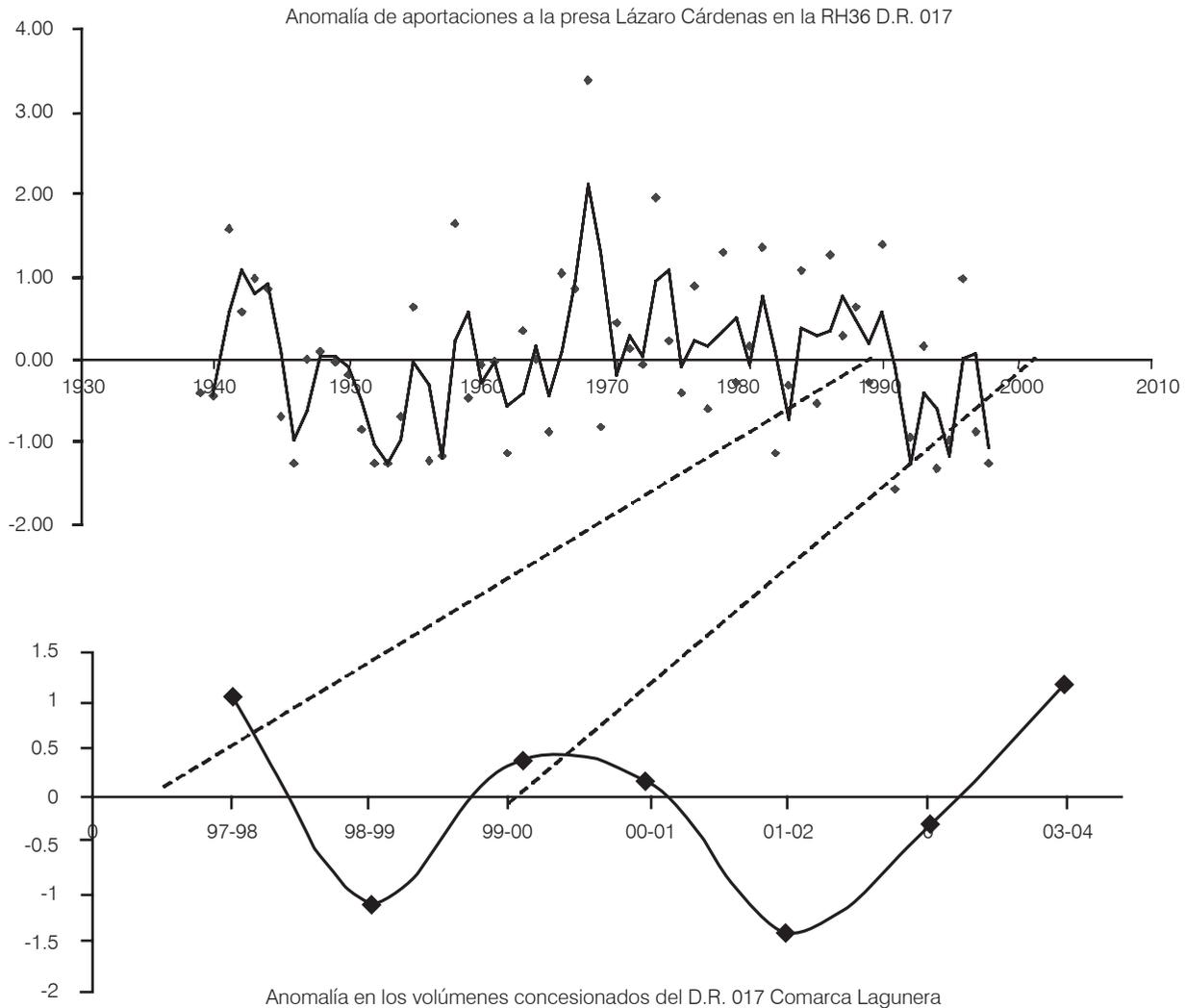
Así, se puede anotar que las principales causas para la reducción en rendimiento en las simulaciones son:

- La reducción del periodo de crecimiento de los cultivos por las altas temperaturas, acelerando su crecimiento con impacto negativo en el llenado de grano. A menor duración del ciclo fenológico de un cultivo, menor es su rendimiento.
- Un decremento en la disponibilidad de agua debido a una combinación de incremento en las tasas de evapotranspiración, incrementando la pérdida de agua del suelo y, en algunos casos, la reducción en precipitación.
- Reducción en temperaturas bajas durante invierno (especialmente para trigo) para el inicio del periodo de floración.

Conclusiones

Los impactos del calentamiento global se harán más patentes en regiones tropicales y específicamente en aquellas áreas en donde la insuficiente precipitación

Ilustración 11. Anomalías en escurrimientos y volúmenes entregados a usuarios del Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera.

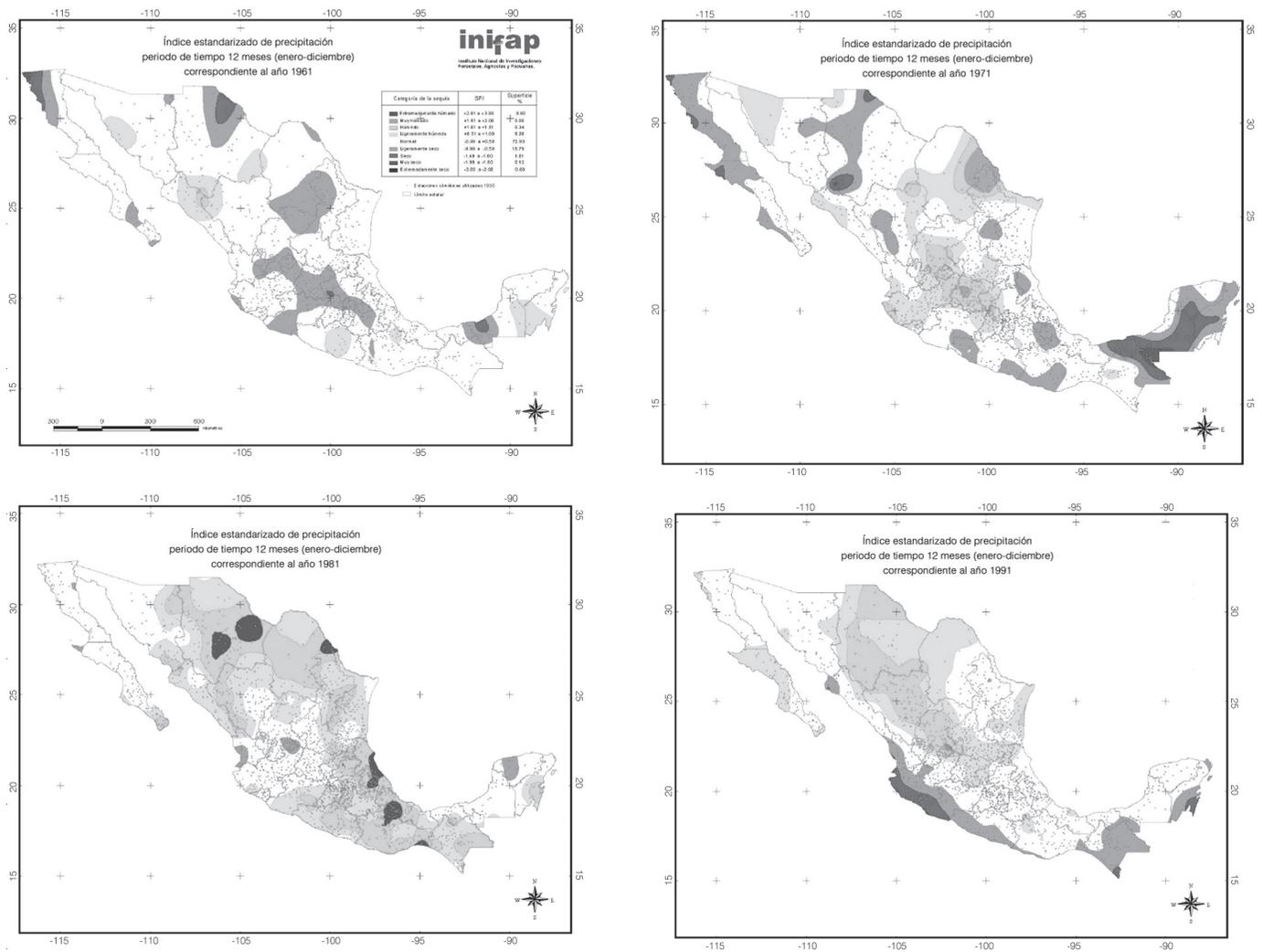


aunada a las altas temperaturas limita la producción de los cultivos. Por otro lado, regiones frías, en donde las bajas temperaturas son la principal limitante, se podrían ver favorecidas por efecto de un calentamiento global.

La incertidumbre climática es el primer impacto del cambio climático global y sus efectos han quedado de manifiesto en diferentes variables de orden económico, social e hidrológico. En zonas de temporal, esta variabilidad climática ha impactado a las superficies siniestradas con incrementos anuales, en función de la duración del periodo seco. En zonas de riego, el impacto ha sido sobre los escurrimientos en el periodo de lluvias que se almacenan en embalses para su posterior uso como fuente de abastecimiento de la agricultura de riego del país.

En México, las variables climáticas, complementadas con información socioeconómica, explican la gran emigración del medio rural, existiendo una cuantificable correlación entre el clima de los estados de la república que mayoritariamente "expulsan" productores al extranjero y el número de personas que emigran. Los escenarios climáticos modelados pronostican una seria reducción en los rendimientos de los principales cultivos, producto del incremento en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, que generarían condiciones propicias para acelerar aún más la emigración de productores rurales hacia las ciudades o al extranjero. Un reto preponderante para el desarrollo científico es la mejora tanto en la capacidad de predicción de modelos climáticos de simulación como en el desarrollo de algoritmos que

Ilustración 12. Índice estandarizado de precipitación anual para cuatro años en México.



permitan prever los impactos en la disponibilidad de alimentos, agua y energía, para poder planear y actuar en consecuencia.

La visión integradora del cambio climático considera la dinámica e interdependencia de causas y efectos en todos los sectores involucrados (ilustración 5). Así, el proceso de toma de decisiones en un contexto de cambio climático es secuencial y bajo gran incertidumbre, la cual incluye cambios no lineales y/o irreversibles, y debiera considerar los riesgos implícitos en las acciones, considerando cuidadosamente las consecuencias ambientales y económicas.

Existen dos estrategias para enfrentar el cambio climático: adaptación y mitigación. Los mecanismos de mitigación o adaptación debieran ser discutidos a altos niveles de toma de decisiones como asunto de

seguridad de Estado. En este aspecto, la comunidad científica tiene mucho que aportar a la generación de mecanismos viables y sustentables. El desarrollo de investigación científica para la generación de información para la adecuada toma de decisiones debiera contemplar diversos cuestionamientos, entre los que se encuentran:

1. ¿Dónde se ubica la población rural más vulnerable a cambios climáticos extremos?
2. ¿Cuáles son los sistemas productivos más vulnerables y cuáles las características más importantes que definen su grado de vulnerabilidad climática?
3. Ante diferentes escenarios de impacto climático, ¿hacia dónde se moverá el potencial productivo de las especies?

Cuadro 2. Algunos impactos potenciales en la producción de granos para México acorde con diferentes escenarios de incremento en CO₂ y para diferentes modelos de simulación del crecimiento de cultivos.

| Escenarios fijos | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------|---------------------|-----------------|------|------|------------------|------|------|------------------|------|------|--|
| Año | ppm CO ₂ | Nivel de adaptación | % cambio a maíz | | | % cambio a arroz | | | % cambio a trigo | | | |
| | | | GISS | GFDL | UKMO | GISS | GFDL | UKMO | GISS | GFDL | UKMO | |
| - | No CO ₂ | No | -43 | -36 | -45 | -43 | -36 | -45 | -53 | -46 | -55 | |
| - | 555 | No | -39 | -32 | -41 | -32 | -25 | -34 | -41 | -34 | -43 | |
| - | 555 | Nivel 1 | -35 | -28 | -37 | -24 | -17 | -35 | -31 | -24 | -33 | |
| - | 555 | Nivel 2 | -17 | -14 | -18 | -12 | -8 | -17 | -15 | -12 | -16 | |

| Escenarios variables | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Año | ppm CO ₂ | Nivel de adaptación | CM3 | |
| | | | | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A1 | A2 | A3 |
| 2020 | No CO ₂ | Nivel 1 | -12 | -12 | -17 | | | -6 | | | | | -6 | | | |
| 2020 | 475 | Nivel 1 | | -8 | -8 | | | | -2 | | | | | 0 | | |
| 2050 | No CO ₂ | Nivel 1 | | | -17 | | | | | | -20 | | | | -20 | |
| 2050 | 574 | Nivel 1 | | | | -13 | | | | | | -9 | | | | -8 |
| 2080 | No CO ₂ | Nivel 1 | | | | | -23 | | | | | | | | | -38 |

GISS: Goddard Institute of Space Studies (Hansen *et al.*, 1983).
 GFDL: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (Manabe y Wetherald, 1987).
 UKMO: United Kingdom Meteorological Office (Wilson y Mitchell, 1987).
 CM#: modelo climático.
 A#: número de corrida.

4. ¿Cómo se afectarán, positiva o negativamente, los ecosistemas del país ante cambios abruptos del clima?
5. ¿Cómo afectará a la economía nacional y cuáles serían los mecanismos de adaptación ante una reducción en la venta de energéticos por presiones internacionales por reducir el consumo de combustibles fósiles o por la inclusión al mercado de fuentes alternas de energía?
6. ¿Cuáles serían los mecanismos y las restricciones de adaptación y mitigación ante diferentes escenarios de posibilidades socioeconómicas?
7. ¿Cómo afectarán a la economía nacional, regional u otra escala, los mecanismos de adaptación y mitigación?
8. Siendo el maíz el principal cereal en la dieta del mexicano, ¿cuáles serían las estrategias de producción y abasto ante la merma en disponibilidad de reservas internacionales de este grano?
9. ¿Cuáles serían las estrategias de mitigación con una vinculación con esfuerzos internacionales para la reducción de contaminantes a la atmósfera?
10. ¿Cómo se estimularían o adaptarían las actividades agropecuarias para arraigar a la población económicamente activa ante cambios climáticos, a fin de disminuir la emigración de la población rural?

11. ¿Cuál será la política de desarrollo tecnológico y científico en México ante el cambio climático?

Algunas limitantes de la investigación

Si bien los métodos descritos en el presente artículo son aquellos indicados para cuantificar índices relacionados con disponibilidad de agua y su impacto en variables socioeconómicas, queda mucho por desarrollar en términos de evaluación de procesos de mitigación del impacto del clima sobre la población rural más vulnerable. Más aún, es necesaria la modelación dinámica de la emigración, considerando variables climáticas y económicas. También es claro que los procesos migratorios no son sólo función de las vicisitudes climáticas, sin embargo, en sociedades rurales de zonas desérticas, esta variable explica en gran medida el abandono de tierras por escasez de agua. En México, el más alto producto interno bruto del sector agropecuario se obtiene de la agricultura de riego, cuyos distritos están ubicados mayoritariamente en la zona árida y semiárida de la porción norte del país, en donde los volúmenes de agua de los embalses dependen del escurrimiento que generan las precipitaciones en las cuencas hidrológicas. Como se ha demostrado en este documento, en los distritos de riego, las variaciones en

patrones de precipitación impactan significativamente la disponibilidad de agua para riego, provocando alteraciones económicas que en los últimos años han impulsado al cambio de actividad, mercado del agua o a la emigración del campo.

Recibido: 20/04/2007
Aprobado: 29/11/2007

Referencias

- ABBASPAUR, K.C. A yield model for use in determining crop insurance premiums. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 60, 1992, pp. 33-51.
- AHRENS, C.D. *Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. New York: West Publishing Company, 1988, 581 pp.
- BARNOLA, J.M., RAYNAUD, D., LORIUS, C. and BARKOV, N.I. Historical CO₂ record from the Vostok ice core. *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2003.
- BANCO DE MÉXICO. *Informe sobre la inflación correspondiente al cuarto trimestre del 2006*. México, D.F.: Banco de México, 30 de enero de 2007.
- BAUDER, H. *Labor movement: how migration regulates labor markets*. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- CASTILLO, D.R. *Definición, clasificación y análisis de las sequías*. Tesis de Licenciatura. México, D.F.: Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo. 1988, pp. 31-59.
- COHESSEN, J.J. and COVELLO, V.T. *Risk analysis: a guide to principles and methods for analyzing health and environmental risks*. Washington, D.C.: Executive Office of the President of the United States, 1989.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua en México 2006*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2006, 2007.
- CONAGUA. *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2001, 127 pp.
- CONAGUA. *Superficies regadas y volúmenes de agua distribuidos en los distritos de riego. 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004. Informes Estadísticos*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAPO. *La situación demográfica en México*. México, D.F.: Consejo Nacional de Población, 2000.
- CONDE C., FERRER, R. and OROZCO, S. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study. *Atmósfera*. Vol. 19, no. 3, 2006, pp. 181-194.
- DELGADO, R.W. and RODRÍGUEZ, H.R. The emergence of collective migrants and their role in Mexico's local and regional development. *Canadian Journal of Development Studies*. Vol. XXII, no. 3, 2001, pp. 1-18.
- EDWARDS, D.C. and MCKEE, T.B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology report number 97-2*. Fort Collins: Colorado State University, 1997.
- ESPARZA, R. *Las mujeres campesinas ante las reformas al artículo 27 de la Constitución*. México, D.F.; GIMTRAP, 1996.
- HANSEN, J., RUSSELL, G., RIND, D., STONE, P., LACIS, A., LEBEDEFF, S., RUEDY, R. and TRAVIS, L. Efficient three-dimensional global models for climate studies Models I and II. *Monthly Weather Review*. Vol. 111, no. 4, 1983, pp. 609-662.
- HUTCHINSON, M.F. Climatic analysis in data sparse regions. In: Muchow, R.C and Bellamy, J.A. (editors). *Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for the Semiarid Tropics and Subtropics*. Brisbane, Australia. 1990, 547 pp.
- INEGI. *II Censo de Población y Vivienda 2005*. México, D.F.: Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática, 2005.
- IPCC. *The Scientific Basis. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Nougier, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. (editors). Cambridge/ New York: Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001, 881 pp.
- KAPERSON, J.X., KAPERSON, R.E. and TURNER II, B.L. *Regions at risk: comparison of threatened environments*. New York: United Nations University Press, 1995.
- KATES, R.W. *The interaction of climate and society*. In: Kates, R.W., Ausubel, J.H. Berberian, M. (editors). *Climate impact assesment: Studies of the interaction of climate and society*. New York: Wiley, 1985, pp. 151-200.
- KIEHL, J.T. and TRENBERTH, K.E. Earth annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 78, 1997, pp. 197-208.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J. and KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22, Anaheim, California, 1993, pp. 179-184.
- MANABE, S. and WETHERALD, R.T. Large scale changes in soil wetness induced by an increase in CO₂. *Journal of Atmospheric Science*. Vol. 44, 1987, pp. 1211-1235.
- MARLAND, G., BODEN, T.A. and ANDRES, R.J. Global, Regional, and National CO₂ Emissions. *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2005.
- MASERA, C.O.R. La ecología global. *Ciencias*. Vol. 81, 2006, pp. 4-15.

- PALACIOS, E.A. La pobreza humana y su medición en México. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. *Informe sobre desarrollo humano 1997*. México, D.F.: PNUD-ONU, 1997.
- PALMER, W.C. Meteorological drought. *Research Paper No. 45*. Washington, D.C.: U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- PRAGER, E.J. y EARLE, S.A. Los océanos. Un llamado a la conciencia mundial. McGraw Hill, 2001, España, 382 pp.
- RIVERA DEL RÍO, R. *Comportamiento espacio temporal de la sequía en el estado de Durango, México*. Tesis de Maestría en Ciencias. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2005, 91 pp.
- ROSENZWEIG, C., PARRY, M., FISCHER G. and FROHBERG, K. Climate change and world food supply. *Research Report No. 3*. Oxford: University of Oxford, environmental Change Unit, 1993.
- SÁNCHEZ-COHEN, I. Fundamentos para el manejo integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. *Libro Científico No. 2*. Gómez Palacio, México: INIFAP-CENID-RASPA, 2005, 272 pp.
- SEDESOL. *Medición de la pobreza en México*. Secretaría de Desarrollo Social [en línea] www.sedesol.gob.mx, 2004.
- SELLERS, W. *Physical Climatology*. Chicago: The University of Chicago Press., 1975, 272 pp.
- STERN, N. *The Economics of Climate Change*. *Stern Review*. Cambridge, New York, 2006, 576 pp.
- TISCAREÑO, L.M. Hurricane Activity and Droughts in Mexico. Presentation at the North American Drought Monitor Meeting. Mexico, D.F.: National Water Commission. Meteorological National Service, 2006.
- UNEP. World Atlas of Desertification. New York: UNEP, 1992.
- WARRIC, R. and BOWDEN, M. *Changing impacts of droughts in the Great Plains*. In: M. Lawson and M. Baker (editors), *The Great Plains: Perspectives and prospects*. Center of Great Plains Studies, University of Nebraska Lincon, 1981.
- WILKS, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series, Academic Press, Ithaca, New York, 1995, 467 pp.
- WILSON, C.A. and MITCHELL, J.F.B. A doubled CO₂ climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 92, no. 13, 1987, pp. 315-343.

Abstract

SÁNCHEZ-COHEN, I., DÍAZ-PADILLA, G., OJEDA-BUSTAMANTE, W., CHEBHOUNI, G., ORONA-CASTILLO, I., VILLANUEVA-DÍAZ, J., GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L. & GONZÁLEZ-CERVANTES, G. *Climate variability in Mexico: some hydrological, social, and economic impacts*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 4, October-December, 2008, pp. 5-24.

Environmental pollution is closely related to the economic growth of nations. According to future development scenarios, an accelerated increase in pollutants it is expected in the near future. In order to correlate climate change with different terrestrial impacts, the energy balance is explained highlighting the presence of greenhouse gases in the atmosphere. Results indicate that Mexican agriculture has suffered the negative impacts of this process in terms of climatic uncertainty and has caused, along with other factors, agricultural field emigration of thousands of rural people. Consequences of global climate change are accounted in terms of precipitation anomalies, water availability and reduction in agricultural productivity according to biological simulation under different climate scenarios. It is concluded that there is a need of action mechanisms and scientific questions to be answered through research.

Keywords: *climate change, climate impacts, rural migration, rainfed agriculture, irrigation zones, greenhouse effect.*

Dirección Institucional de los autores:

*Dr. Ignacio Sánchez-Cohen
Dr. José Villanueva-Díaz
Dr. José Luis González-Barrios
Dr. Guillermo González-Cervantes*

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Km. 6.5 Canal Sacramento, Zona Industrial Gómez Palacio Durango, México
teléfonos: + (52) (871) 719 1076 y 719 1077
fax: + (52) 719 1134
sanchez.ignacio@inifap.gob.mx
villanueva.jose@inifap.gob.mx
gonzalez.barrios@inifap.gob.mx
gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx

M.C. Gabriel Díaz-Padilla

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)
Campo Experimental Jalapa
Km. 6 Carretera Xalapa-Veracruz (Edificio Sagar), A.P.540
Xalapa, Veracruz, México
teléfono: + (52) (228) 9128 125744
diaz.gabriel@inifap.gob.mx

Dr. Waldo Ojeda-Bustamante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
C.P. 62550 Jiutepec, Morelos, México
teléfono: + (52) (777) 329 3600
wojwda@tlaloc.imta.mx

Dr. Ghani Chebhouni

Institut de Recherche pour le Développement
Cicerón 609, Col. Los Morales
C.P. 11530 México, D.F.
teléfono: + (52) (55) 5280 7688
fax: + (52) (55) 5282 0800
ghani.chehbouni@ird.fr

Dr. Ignacio Orona-Castillo

Universidad Juárez del Estado de Durango
Facultad de Agricultura y Zootecnia
Km. 35 Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo
Apartado Postal 1-142
C.P. 35000 Gómez Palacio, Durango, México
teléfonos: + (52) (871) 711 8876
fax: + (52) (871) 711 8875
orokaz@yahoo.com.mx