

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México.
<i>Autor / Adscripción</i>	<p>Martín José Montero Martínez Comisión Nacional del Agua, México</p> <p>Waldo Ojeda Bustamante Julio Sergio Santana Sepúlveda Ricardo Prieto González Instituto Mexicano de Tecnología del Agua</p> <p>René Lobato-Sánchez Comisión Nacional del Agua, México</p>
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 4(2): 113-128
<i>Fecha de publicación</i>	2013
<i>Resumen</i>	<p>Los modelos de circulación general acoplados permiten proyectar el clima futuro, pero no hay un modelo único, por lo que se recurre a ensambles de varios modelos. En este trabajo se utilizó un método estadístico para obtener un ensamble usando 23 modelos de circulación general mediante el algoritmo de fiabilidad de ensamble ponderado que considera dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo para reproducir el clima actual y la convergencia de los cambios proyectados entre los modelos seleccionados. Como caso de aplicación del sistema, se generaron las proyecciones de cambio climático para el distrito de riego 075, localizado en el norte del estado de Sinaloa, México.</p>
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1303

SISTEMA DE CONSULTA DE PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO

• Martín José Montero-Martínez* •
Comisión Nacional del Agua, México

*Autor de correspondencia

• Waldo Ojeda-Bustamante • Julio Sergio Santana-Sepúlveda •
• Ricardo Prieto-González •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• René Lobato-Sánchez •
Comisión Nacional del Agua, México

Resumen

Los modelos de circulación general acoplados permiten proyectar el clima futuro, pero no hay un modelo único, por lo que se recurre a ensambles de varios modelos. En este trabajo se utilizó un método estadístico para obtener un ensamble usando 23 modelos de circulación general mediante el algoritmo de fiabilidad de ensamble ponderado que considera dos criterios de fiabilidad: el desempeño del modelo para reproducir el clima actual y la convergencia de los cambios proyectados entre los modelos seleccionados. Se regionalizaron los datos de precipitación, y temperaturas máxima y mínima de superficie, con los escenarios SRES-A1B y SRES-A2 para el siglo XXI, y se incrementó su resolución espacial a una malla regular de $0.5 \times 0.5^\circ$ sobre México. Para facilitar el manejo de estos resultados se desarrolló un sistema, Sedepecc, que contiene las proyecciones generadas en una base de datos y las presenta a través de una interfaz amigable. El análisis de las anomalías proyectadas para el presente siglo en México indica un incremento general en temperatura y un decremento en precipitación. Los resultados indican que el cambio de la temperatura será mayor para el verano que para el invierno, acentuándose para las últimas tres décadas del presente siglo, donde los valores se proyectan por arriba de los 5°C para algunas regiones del centro del país. Como caso de aplicación del sistema, se generaron las proyecciones de cambio climático para el distrito de riego 075, localizado en el norte del estado de Sinaloa, México.

Palabras clave: calentamiento global, modelos de circulación general acoplados, ensamble de escenarios climáticos, distritos de riego, técnicas de reducción de escala, sistemas informáticos.

Introducción

El clima de la Tierra está determinado por la energía proveniente del Sol y por las propiedades variables de la Tierra y su atmósfera relacionadas con la reflexión, absorción y emisión de energía dentro de la atmósfera y en la superficie terrestre. En los últimos 250 años se han acentuado cambios en la atmósfera y en la superficie terrestre que han alterado el balance de la energía global de

la Tierra de manera importante y que por tanto pueden causar cambios significativos en el clima y en los ecosistemas (IPCC, 2007). Probablemente el cambio más importante sea el incremento en la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI), que atrapan la energía terrestre saliente de onda larga, produciendo un efecto invernadero que contribuye a aumentar la temperatura del planeta; por tanto, tienen el potencial de modificar los patrones climáticos actuales (IPCC,

2007). El efecto invernadero ha sido benéfico para la vida en la Tierra: sin la presencia de los GEI, de los cuales el principal gas es el vapor de agua, la temperatura media de la superficie sería de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, en vez de los $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ actuales. El problema radica en que la concentración actual de CO_2 y CH_4 excede ampliamente los niveles preindustriales calculados a partir de núcleos de hielo polares con más de 650 000 años (Solomon *et al.*, 2007); estos cambios en la composición de la atmósfera pueden propiciar un incremento considerable en la temperatura media de la superficie de la Tierra. Así, se proyecta que la temperatura de la superficie media global aumentará de 1.8 a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para fines de siglo, en comparación con la década de 1980, y el nivel medio del mar aumentaría de 0.18 a 0.59 m en ese periodo, según los Modelos de Circulación General Acoplados (MCGAs) (Solomon *et al.*, 2007).

Pielke y Wilby (2012) han explicado las diversas metodologías para proveer información sobre los posibles impactos del cambio climático, entre las se encuentran la reducción de escala de modelos climáticos con técnicas dinámicas y estadísticas (Wilby y Fowler, 2010). Las técnicas dinámicas se basan en modelos climáticos regionales que resuelven de forma más detallada características como la topografía (Castro *et al.*, 2005). Las técnicas estadística usan funciones de transferencia (por ejemplo, regresiones lineales), que representan las relaciones observadas entre las variables atmosféricas de gran-escala y variables locales, como la precipitación o la temperatura (Wilby y Fowler, 2010). En México, Magaña *et al.* (2012) han realizado una reducción de escala estadística de escenarios de cambio climático utilizando una herramienta informática conocida como Climate Predictability Tool (CPT) (IRI, 2009). Por otra parte, la base de datos descrita en el presente trabajo puede ser utilizada para proporcionar la información de las variables de precipitación y temperatura ante escenarios de cambio climático, para diversos estudios que calculen los posibles impactos del cambio climático en México, así

como un modo de comparar los resultados obtenidos por otras técnicas de reducción de escala tanto estadísticas como dinámicas.

Para facilitar el análisis de datos climáticos, de forma usual se recurre a proyecciones de algunos modelos y un par de escenarios de emisiones debido que no existe un modelo que reproduzca de manera confiable la climatología pasada. Existen proyecciones globales de cambio climático a gran escala de varios MCGAs, que incluye a México, proporcionados por el IPCC en su último reporte de evaluación (IPCC, 2007). A partir de estas proyecciones climáticas, Magaña y Caetano (2007) presentaron proyecciones regionalizadas para cuatro escenarios de emisiones y 24 MCGAs con resolución espacial de $50 \times 50\text{ km}$ para el periodo 2010-2100. Sin embargo, dicha información es voluminosa, con cerca de cien realizaciones de datos para México. Ante este panorama existe la necesidad de contar con sistemas informáticos que faciliten la consulta regionalizada de proyecciones de cambio climático e integren en una sola base de datos la mayoría de los modelos MCGAs disponibles para México.

Cambios en los patrones actuales de la temperatura y precipitación pueden ocasionar grandes efectos en el manejo, desarrollo y demanda hídrica de los cultivos, y en la planeación y gestión de los recursos hídricos de una zona de riego; como además los impactos del cambio climático deben estudiarse de forma local, dada la variabilidad espacial y temporal de las proyecciones de los modelos de circulación general (Rosenzweig y Daniel, 1989), es de interés para los administradores de una zona de riego disponer de bases de datos con proyecciones de las principales variables climáticas de interés agrícola, como lo reportan Ojeda-Bustamante *et al.* (2011), al analizar el impacto del cambio climático en los requerimientos de riego de un distrito de riego en México.

Ante la falta de sistemas informáticos que integren y faciliten la consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para

México, los objetivos del estudio fueron: 1) la regionalización para México de las simulaciones generadas por los Modelos de Circulación General Acoplados, utilizando el método de la Fiabilidad del Ensemble Ponderado (FEP) documentados por Giorgi y Mearns (2002), y Giorgi y Francisco (2000), para obtener proyecciones de la precipitación y la temperatura en la superficie terrestre, para dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero: A1B y A2; 2) el desarrollo de un sistema de consulta climática que procese la información generada y la presente de una manera amigable; 3) la utilización del sistema para un caso de aplicación, a fin de generar las proyecciones de cambio climático para el distrito de riego 075, localizado en el norte del estado de Sinaloa, México.

Metodología

El método de Fiabilidad del Ensemble Ponderado (FEP)

La finalidad del método FEP es obtener un valor único ponderado de los cambios esperados en una variable climática para cada paso de tiempo a partir de un conjunto de N estimaciones, correspondientes al mismo número de MCGAs. Para el caso de la variable climática temperatura, ese valor estaría denotado por $\tilde{\Delta T}$ en el algoritmo iterativo utilizado, que se muestra de manera gráfica en la figura 1. Una estimación inicial de ese valor es el promedio aritmético simple de los cambios de la temperatura, que se denota por $\overline{\Delta T}$ (etiqueta 1 de la figura 1) y está dado por:

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} \Delta T_i \quad (1)$$

donde N es el número total de modelos usados; y ΔT_i indica el cambio de la temperatura simulado por cada modelo i para un tiempo dado.

Por su parte, el FEP propone:

$$\tilde{\Delta T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad (2)$$

donde $\tilde{\Delta T}$ es un promedio ponderado, en el que cada ΔT_i se multiplica por un factor de fiabilidad, R_i , denotado por:

$$R_i = \left[(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n \right]^{1/(m \times n)} \quad (3)$$

$$= \left\{ \left[\frac{\epsilon_T}{\text{abs}(B_{T,i})} \right]^m \left[\frac{\epsilon_T}{\text{abs}(D_{T,i})} \right]^n \right\}^{1/(m \times n)}$$

La figura 1 muestra que el factor R_i (etiqueta 3) depende de dos factores: $R_{B,i}$ y $R_{D,i}$ que corresponden a los pesos de cada modelo i , en términos de su sesgo ($B_{T,i}$) y su distancia ($D_{T,i}$). A su vez, en la primera iteración, $D_{T,i}$ depende del valor $\overline{\Delta T}$ y se calcula con $[D_{T,i}] = [\Delta T_i - \overline{\Delta T}]$. De esta manera, $\overline{\Delta T}$ se usa para generar la primera estimación del factor de fiabilidad del modelo, R_i con el procedimiento iterativo indicado en la figura 1 y con base en la ecuación (3). El parámetro ϵ_T en la ecuación (3) es una medida de la variabilidad natural,

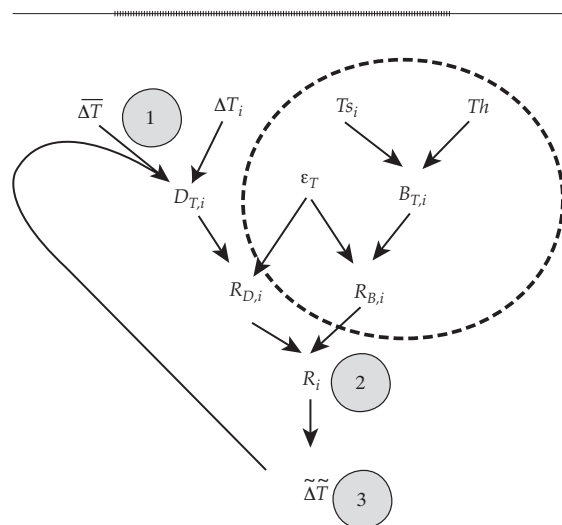


Figura 1. Diagrama de dependencias de variables utilizado en el algoritmo del método FEP.

estimada con los promedios de registros de temperatura y precipitación regional. Para obtener ϵ_T se calcularon las series de tiempo de temperatura y precipitación promedio regional observadas para el siglo XX. Posteriormente se calcularon los promedios móviles de treinta años de las series climáticas, después de desfasar linealmente los datos para remover las tendencias de escala por siglo, y se estimó ϵ_T como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de esos promedios.

El sesgo del modelo, B_{T_i} , se calcula como la diferencia entre la temperatura media simulada, T_{S_i} y la observada, Th_i , para el periodo base de 1961-1990. El factor R_{B_i} establece que mientras mayor sea el sesgo, menor es la fiabilidad del modelo. La distancia D_{T_i} define que se aparta la anomalía de temperatura del modelo i , ΔT_i , del promedio ponderado estimado de todos los modelos, $\tilde{\Delta T}$, a cuyo cálculo se llega iterativamente, como se muestra en la figura 1. Así, el factor R_{D_i} establece que mientras mayor sea la distancia, menor es la fiabilidad del modelo. Por tanto, la distancia es una medida del grado de convergencia de un modelo con respecto a los demás.

Giorgi y Mearns (2002) calcularon la correlación entre los sesgos y las distancias entre modelos para una región y periodo dado, y encontraron que la correlación era, en general, pequeña, usualmente menor a 0.5. Un sesgo grande para un modelo no implica una distancia grande correspondiente y viceversa. Esto es, los principales modelos, cuyas proyecciones se encuentran en la parte más alejada del promedio del ensamble para el clima futuro, no son necesariamente los modelos que muestran un desempeño pobre en cuanto a reproducir las condiciones del clima presente. De manera usual, algunos parámetros asociados con los modelos son ajustados para reproducir mejor el clima actual, pero podrían estar caracterizados por una fuerte sensibilidad a forzamientos climáticos actuales que no necesariamente se presentarán en el futuro.

Con el valor de cada R_i correspondiente a cada MCGA se obtiene la siguiente aproxi-

mación del cambio promedio ponderado de los miembros del ensamble, $\tilde{\Delta T}$, que en la figura 1 se ha etiquetado con el número 3, y que se calcula con la ecuación (3), donde el operador $\tilde{\Delta}$ denota el promedio ponderado FEP.

El cálculo de $\tilde{\Delta T}$ es el resultado de un proceso iterativo que se ilustra en la figura 1. Las variables encerradas en el óvalo punteado se calculan una vez. A partir de la segunda iteración, la distancia está dada por $[D_{T_i}] = [\Delta T_i - \overline{\Delta T}]$, sin embargo, como en la primera iteración se desconocía el valor de $\tilde{\Delta T}$, en su lugar se usó el promedio del ensamble $\overline{\Delta T}$, dado por la ecuación (1). De manera típica, este procedimiento converge con rapidez después de algunas iteraciones (Giorgi y Mearns, 2002). La distancia del promedio FEP es solamente un criterio de convergencia del modelo, dado que las condiciones futuras son desconocidas. Ello no implica que el promedio FEP represente la respuesta del clima verdadero a un escenario de forzamiento dado, sino que más bien representa la mejor respuesta estimada a partir de los valores generados por los modelos.

Los parámetros m y n en la ecuación (3) se pueden usar para ponderar cada criterio. En concordancia con Giorgi y Mearns (2002), se asumió que m y n son iguales a 1, asignando el mismo peso a ambos criterios. Lo anterior implica que se le da el mismo valor específico en la ponderación al criterio de desempeño que al criterio de convergencia. Si por alguna razón se decidiera que es más valioso que los MCGA cumplan el criterio de desempeño que el de convergencia, entonces se tendría que asignar un peso mayor al primer criterio (por ejemplo, $m = 2$ y $n = 1$). También, R_B y R_D se toman como 1 cuando B y D son menores que ϵ_T respectivamente. La ecuación (3) indica que el valor proyectado por un modelo es fiable si tanto el sesgo como la distancia del promedio del ensamble se encuentran dentro de la variabilidad natural observada, de tal forma que $R_B = R_D = R = 1$. Si el sesgo o la distancia crecen, la fiabilidad de la simulación de un modelo dado decrece. Cuando R_B y R_D son menores que 1, el valor de ϵ_T se cancela en el

operador FEP de la ecuación (3), y el factor de fiabilidad se reduce al recíproco del producto del sesgo y la distancia.

Fuentes de los datos

En el cuadro 1 se presentan la resolución y el país de origen de los 23 modelos de circulación general acoplados (MCGAs), usados para la generación del ensamble de escenarios de cambio climático y que fueron considerados por el IPCC en su última comunicación (IPCC, 2007). Los MCGA incluyen componentes dinámicos que describen procesos atmosféricos, oceánicos y de superficie terrestre, así como los hielos marinos y otros componentes. Aunque las dinámicas a gran escala de estos modelos son integrales, se sigue parametrizando para representar procesos físicos aún no resueltos, como la formación de nubes y precipitación, el océano y la formación de masas de agua, etcétera. La incertidumbre en el proceso de parametrización es la razón primaria por la cual las proyecciones climáticas difieren entre distintos MCGAs (Solomon *et al.*, 2007).

Dentro del Reporte Especial sobre Escenarios de Emisión, conocido como SRES por sus

siglas en inglés (IPCC, 2000), se encuentran como parte de la gama de escenarios ilustrativos los conocidos como B1, A1T, B2, A1B, A2 y A1F, los cuales estiman concentraciones de dióxido de carbono aproximadamente equivalentes, que corresponden al forzamiento radiativo calculado debido a gases de efecto invernadero y aerosoles antropógenos en 2100, con unas 600, 700, 800, 850, 1 250 y 1 550 ppm, respectivamente. En este trabajo se han seleccionado los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero SRES-A1B y SRES-A2, porque representan un escenario medio y un escenario intensivo, respectivamente, en cuanto a emisiones totales proyectadas hasta el año 2100 (IPCC, 2000). La selección de estos dos escenarios también obedece a la disponibilidad de datos en el portal del IPCC (www.ipcc-data.org), en los 23 modelos que se usaron.

Para uniformizar las simulaciones de los MCGA, los valores fueron interpolados a una malla de $0.5 \times 0.5^\circ$ mediante el programa GrADS (Grid Analysis Display System), que utiliza el algoritmo de Hensen del Fleet Numerical Oceanographic Center (FNOOC, 1986), con una interpolación bilineal, con funciones de tipo Bessel.

Cuadro 1. Relación de modelos de Circulación General Acoplados (MCGA) utilizados con resolución en grados.

Modelo (país de origen)	Resolución (long. × lat.)	Modelo (país de origen)	Resolución (long. × lat.)
1. BCCR-BCM2.0 (Noruega)	2.81 × 1.45	2. CCCMA-CGCM3 (Canadá)	3.75 × 3.75
3. CNRM-CM3 (Francia)	2.81 × 1.45	4. CSIRO-MK3.5 (Australia)	1.875 × 1.875
5. CSIRO-MK3 (Australia)	1.875 × 1.875	6. MPI_ECHAM5 (Alemania)	1.875 × 1.875
7. MIUB_ECHO_G (Alemania/Corea)	3.75 × 3.75	8. GFDL-CM2.0 (EUA)	2.5 × 2
9. GFDL-CM2.1 (EUA)	2.5 × 2	10. INGV-ECHAM-SXG (Italia)	1.125 × 1.125
11. INMCM3.0 (Rusia)	5 × 4	12. IPSL- CM4 (Francia)	3.75 × 2.5
13. MIROC3_2_MEDRES (Japón)	2.81 × 2.8125	14. MRI_CGCM2_3_2A (Japón)	2.81 × 2.8125
15. NCAR_CCSM3_0 (EUA)	1.406 × 1.406	16. NCAR_PCM1 (EUA)	2.81 × 2.8125
17. UKMO_HADCM3 (Reino Unido)	3.75 × 2.47	18. UKMO_HADGEM1 (Reino Unido)	1.875 × 1.24
19. CCCMA-CGCM3 (Canadá)	2.81 × 2.8125	20. IAP-FGOALS (China)	2.81 × 2.8125
21. GISS-AOM (EUA)	4 × 3	22. GISS-EH (EUA)	5 × 3.91
23. MIROC3_2_HIRES (Japón)	1.125 × 1.125		

Para generar el periodo climático base de referencia se utilizó la temperatura media máxima y mínima diaria, y la precipitación acumulada mensual de la base de datos climática histórica CRU TS 2.1, generada por la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia, Gran Bretaña, que tiene una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, con datos mensuales del periodo 1901-2002. Dicha base contiene datos de estaciones de referencia, como es descrita por Mitchell y Jones (2005).

Aplicación del método

En la figura 2 se resume la implementación del método FEP al pasar de una malla típica de MCGA de $2.5 \times 2.5^\circ$ (A) a una malla más fina de $0.5 \times 0.5^\circ$ (B), con una resolución más adecuada para estudios de impacto regional. Se muestra que el promedio aritmético de los 23 modelos (figura 2A) puede ser diferente que el promedio ponderado calculado por el método FEM, inclusive puede cambiar de signo, como se presenta para diferentes zonas de México (el centro y sur de la península de Baja California; el noroeste y centro norte de México, y en la península de Yucatán). Lo anterior se explica por el hecho de que el FEP no necesariamente sigue la tendencia

del promedio aritmético del ensamble de modelos, sino que pondera los mejores modelos de acuerdo con los dos criterios de fiabilidad, representados por los factores $R_{B,i}$ y $R_{D,i}$. Sin embargo, en la mayoría de los casos se observa una correspondencia adecuada entre los resultados de gran escala y los de escala regionalizada obtenida con el método FEP. En particular, Montero y Pérez (2008), en su figura 1.3, presentaron resultados del mes de julio para la década de los años 2080, para el promedio de los factores de fiabilidad $R_{B,i}$ y $R_{D,i}$ y el combinado de éstos, R_p , donde se puede apreciar que las zonas de mayor confianza para la precipitación en México durante este periodo resultan ser la península de Baja California y la región noreste del país.

Procesamiento y uso de la información

La base de datos del sistema usa el ensamble de 23 modelos MCGAs generados para México en una base de datos en Excel (Montero y Pérez, 2008). El volumen de información generada para regionalizar las proyecciones de cambio climático es difícil de usar, extraer y manipular de manera directa. Por esta razón se desarrolló un sistema de extracción de información climática denominado Sistema

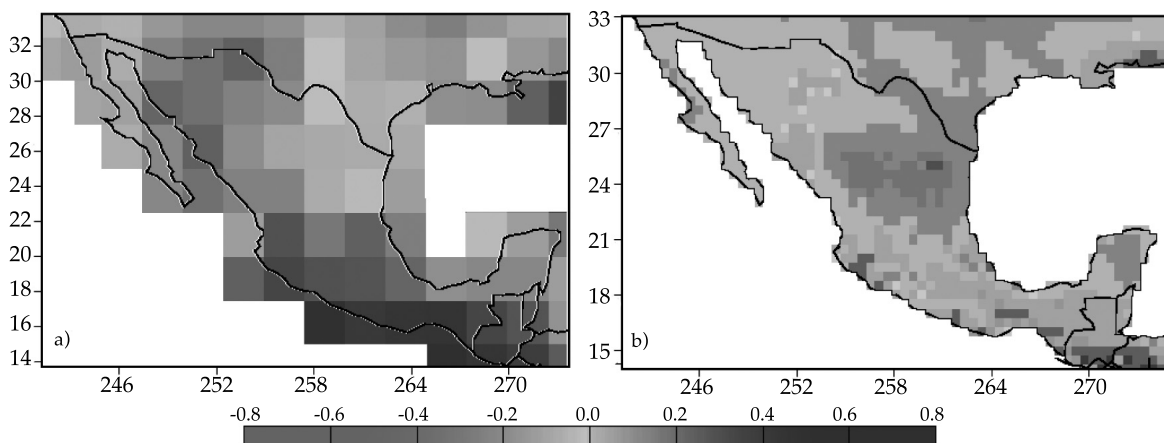


Figura 2. Anomalía mensual de la precipitación, mes de octubre en la década de 2020 (en mm/d), para el promedio simple de los modelos en una malla típica de MCGA (a) y su respectiva regionalización a través del método FEP (b).

para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México (Sedepecc). Los datos pueden ser consultados usando la versión web del Sedepecc!!, disponible en el sitio <http://galileo.imta.mx/aplisedepecc.php>.

Los componentes del sistema Sedepecc (figura 3) son:

1. La base de datos que contiene los datos climáticos del sistema. Para facilitar las consultas se convirtieron los datos de su formato original NetCDF al formato xls de Excel, y se almacenaron en un directorio o carpeta del sistema.
2. La interfaz gráfica (figura 4) permite realizar la consulta al sistema, especificando las coordenadas geográficas del punto de interés de la república mexicana, el periodo de proyección, el escenario de emisiones y la variable de interés. La interfaz tiene cuatro áreas de consulta y despliegue de información.

El menú principal contiene, entre otras cosas, un submenú de ayuda, en el que se explica el uso del sistema.

La ventana de especificación del alcance de la consulta de información climática incluye escenario de emisiones, variable climática y periodo de interés.

El tipo de salida requerida para generar la gráfica de la serie de tiempo o archivo en formato xls de Excel, con los datos proyectados de acuerdo con la consulta especificada.

El sistema se desarrolló con la plataforma de programación Java, por lo que es independiente del sistema operativo.

El estudio de aplicación fue el Distrito de Riego 075 (DR-075), con una superficie regable de 211 mil ha, el distrito con mayor superficie en México. Se localiza en el Valle del Fuerte, estado de Sinaloa, México, 25.4-26.1° N y 108.4-109.4° O, y con una altitud promedio de 20 m. Existen seis celdas numeradas del uno al seis, con valores de proyecciones de cambio climático en la base de datos del sistema en el área de influencia del DR-075, como se muestra en la figura 5.

En virtud de que la superficie del DR-075 se encuentra dispersa en seis celdas, se calcularon las anomalías de la variable X con la siguiente ecuación:

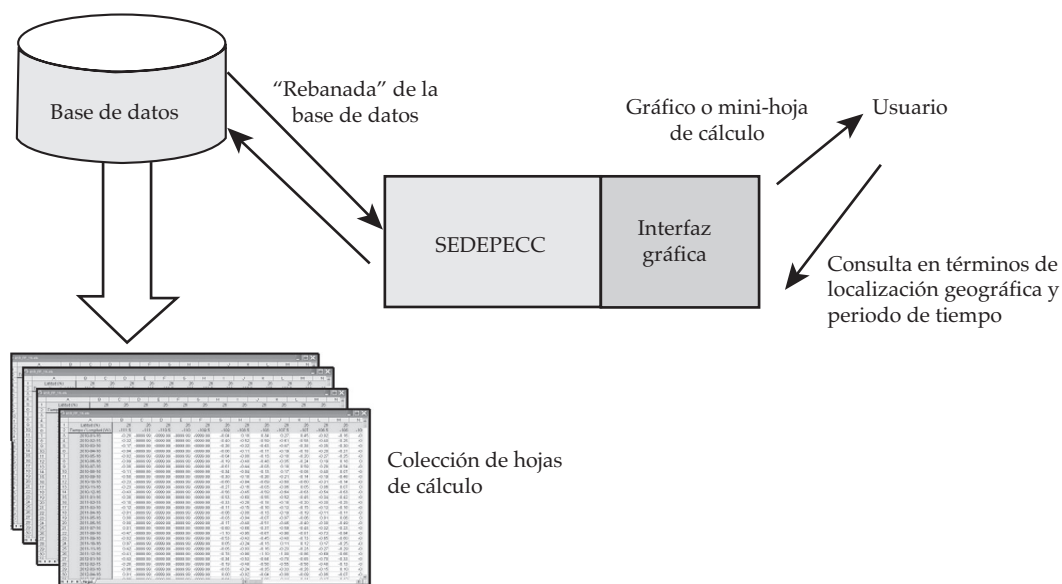


Figura 3. Arquitectura del sistema.

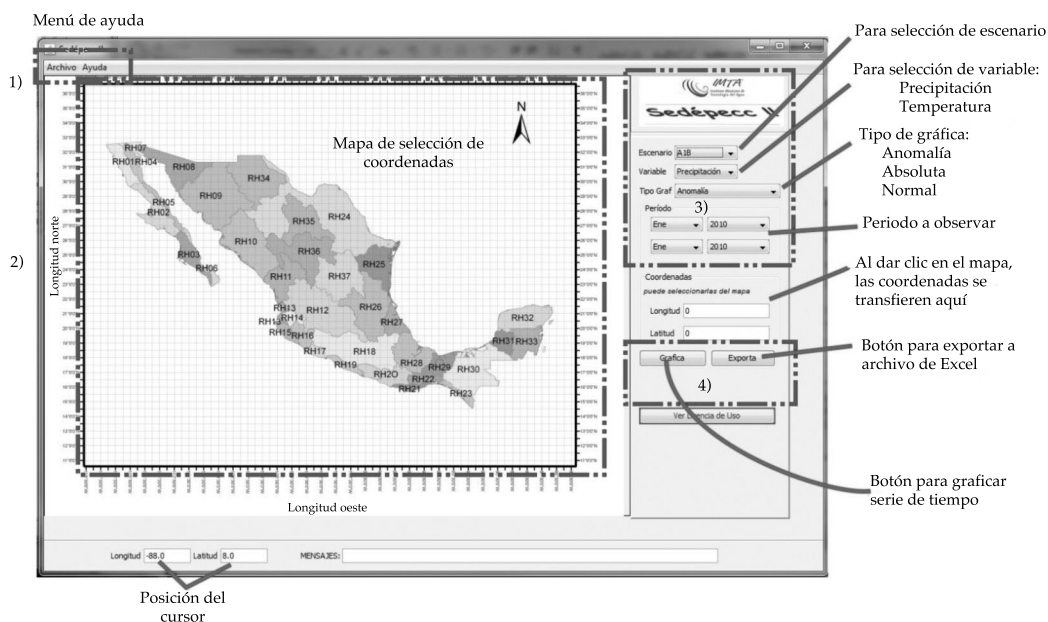


Figura 4. La interfaz al usuario del sistema Sedepecc

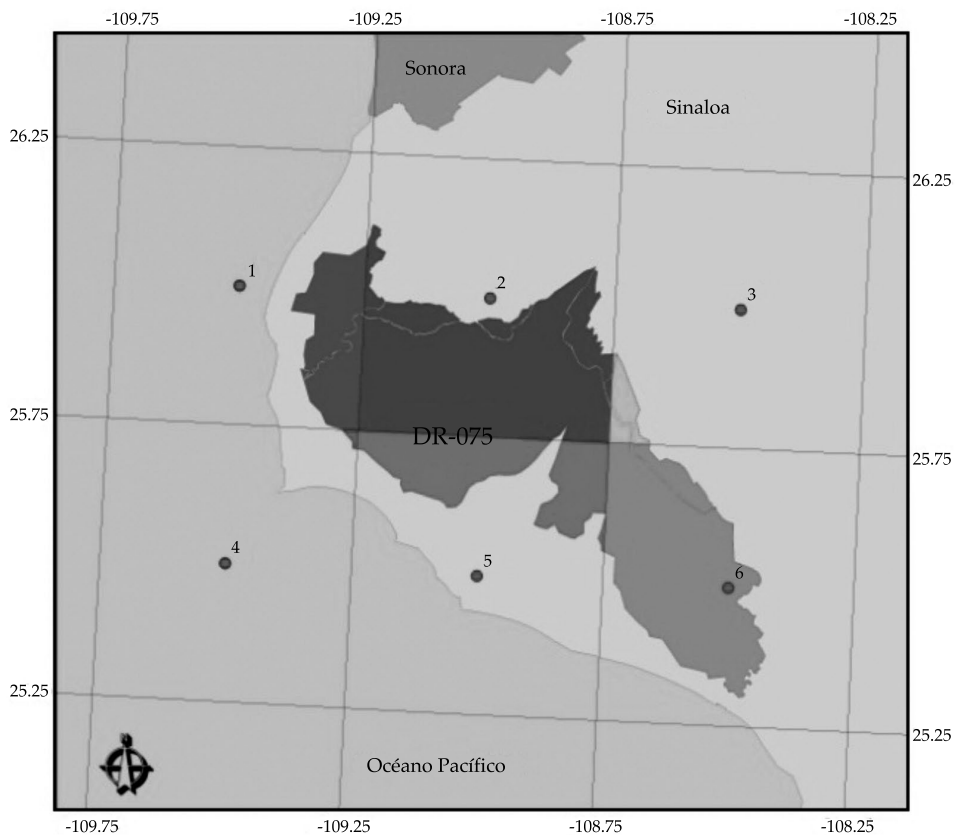


Figura 5. Localización del distrito de riego 075 y las seis celdas usadas.

$$\Delta X = \sum_{i=1}^n P_i \Delta x_i \quad (4)$$

donde P_i es el peso de la celda i , con anomalía Δx_i , estimado como la fracción de área de la zona de riego que se encuentra en el área de influencia de cada celda i con respecto al área total. Para el caso de aplicación mostrado en la figura 5, los pesos corresponden a las fracciones de superficie del DR-075 de las celdas 1, 2, 3, 4, 5, y 6, que fueron estimadas en 0.112, 0.40, 0.024, 0.002, 0.162 y 0.30. El sistema desarrollado facilita la consulta de proyecciones climáticas para una malla regular de $0.5 \times 0.5^\circ$ a través de su interfaz de despliegue gráfico (figura 6).

Como ejemplo de extracción de proyecciones climáticas usando el sistema desarrollado, se presenta en la figura 7 la variación mensual diaria de las anomalías en la precipitación de las seis celdas x_i de la figura 5, para un periodo de tres años, que corresponde a 36 valores mensuales. Los valores de la variable climática de interés X para la zona

de riego pueden estimarse usando la ecuación (4), considerando los valores de la variable x_i y el peso P_i para cada celda en el área de influencia del distrito de riego DR-075. Las anomalías mensuales de la precipitación pueden ser obtenidas al multiplicar el número de días del mes por la anomalía diaria y la anomalía anual, al acumular las anomalías mensuales del año. Para cada mes se tienen en la figura 7 seis valores de las anomalías que corresponden a las celdas en el área de influencia del distrito de riego 075 (figura 5) y un valor global de la variable ponderada con el símbolo "+".

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos con la aplicación del método FEP para el escenario SRES-A2 (figura 8) muestran una disminución generalizada de la precipitación en México, tal como fue reportado por Magaña y Caetano (2007), y por Seager *et al.* (2010), para el suroeste de Estados Unidos, con cambios porcentuales más

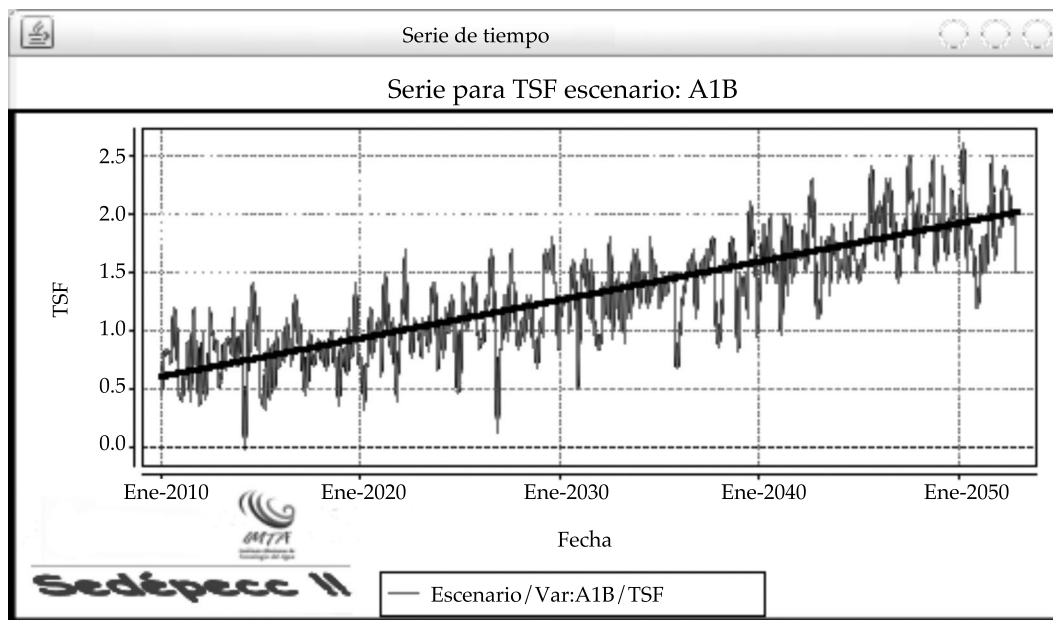


Figura 6. Serie de tiempo de anomalía de temperatura superficial generada por el sistema para el escenario de emisiones A1B, para las coordenadas de la celda 2 de la figura 5.

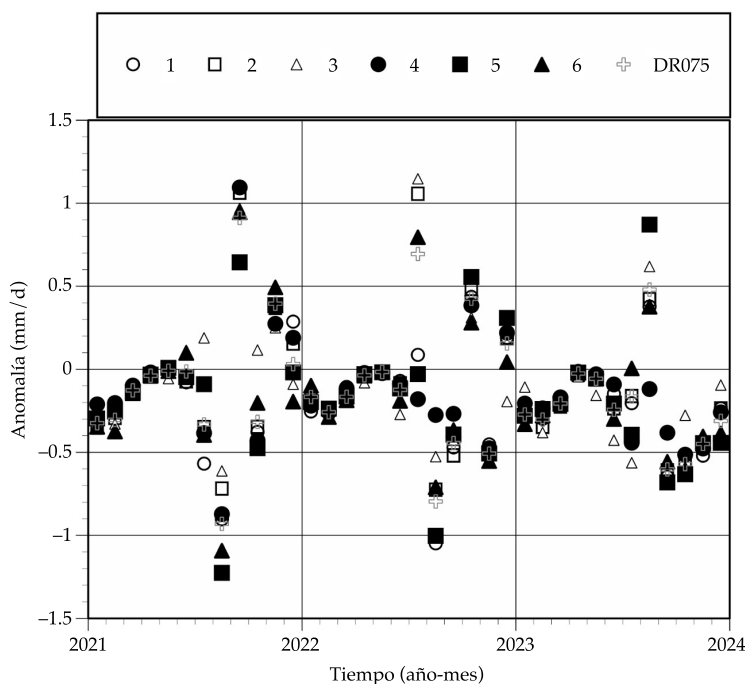


Figura 7. Variación de las anomalías en la precipitación mensual diaria para las seis celdas en el área de influencia del DR075 y el valor distrital ponderado.

pronunciados en invierno que en verano. Existe una microrregión localizada al suroeste de Coahuila donde se observan cambios positivos de precipitación para el verano.

Hay ciertas regiones, como la parte occidental del país, que presentan cambios drásticos en la precipitación para el invierno, en tanto que otras permanecen sin cambios significativos. Tabasco y el norte de Chiapas no muestra cambios significativos durante el invierno; pero para el verano, los modelos indican una mayor probabilidad de decremento en la precipitación con respecto al periodo base, que van desde -5 a -10% para el periodo 2010-2039 hasta -35 a -40% para final del siglo (2070-2098).

Se proyectan cambios positivos (es decir, mayor calentamiento) en la temperatura del país para este siglo, que con respecto al pasado inmediato (figuras 9 y 10). Se observa también que los 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 son mayores que en invierno para ambas temperaturas. Los cambios de mayor magnitud para la temperatura máxima sobrepasan los 5 °C para algunas zonas localizadas en el centro del país durante el verano para finales de siglo (figura 10).

Para el caso de aplicación agrícola, presentado en las figuras 5, 6 y 7, se observa una tendencia significativa a disminuir la precipitación en ambos escenarios (figura 11). El escenario A2 presenta una mayor disminución (-1.1 mm/año) en la precipitación para fines de siglo que el escenario A1B (-0.81 mm/año), así como mayor variabilidad de la precipitación durante el presente siglo. Una disminución en la precipitación de una zona de riego indica un incremento en los requerimientos de riego de los cultivos, por lo que se deberán implantar acciones de adaptación por posibles impactos del cambio climático, al disminuir la precipitación e incrementarse la temperatura.

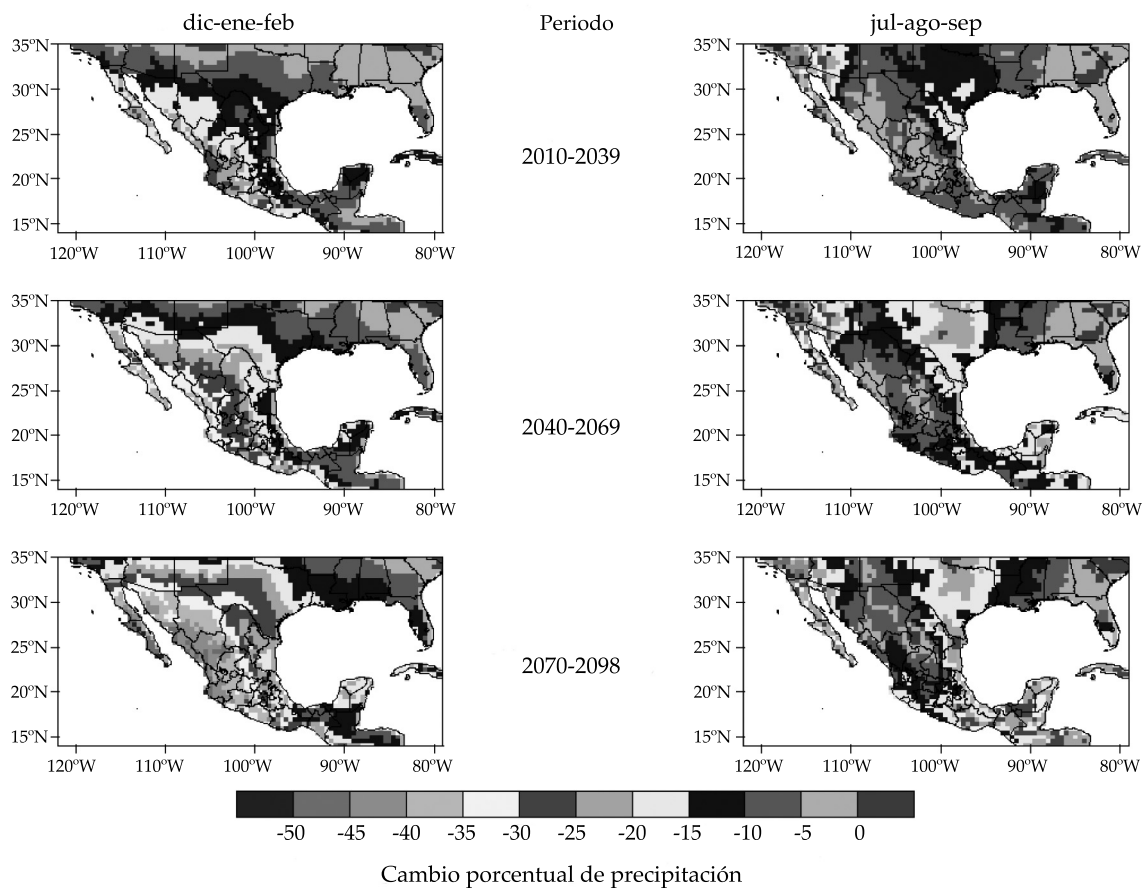


Figura 8. Cambio porcentual de precipitación promedio estimada a través de FEP, usando datos de 23 CGCMs para el escenario SRES-A2, en relación con el periodo 1961-1990. Las anomalías están dadas para los meses de invierno (izquierda) y verano (derecha), y los periodos de 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2098.

Sedepecc!! es una contribución importante para el desarrollo de estudios de adaptación al cambio climático en México. Aunque existen sistemas de información similares en el país (Magaña *et al.*, 2012) y el extranjero (por ejemplo, *ci:grasp*), Sedepecc!! tiene ventajas sobre los mismos. En el primer caso, Magaña *et al.* (2012) utilizan la herramienta informática CPT, cuyo desarrollo fue dirigido a pronósticos climáticos estacionales y no a escenarios de cambio climático, por lo que su concepto e implementación son fuentes de diferencias importantes con respecto a Sedepecc!!; mientras que la herramienta *ci:grasp* contiene información gráfica relevante, sin embargo no es posible extraer la información numérica de la plataforma,

limitando de ese modo las posibles aplicaciones que pueda tener, además de que el *ci:grasp* contiene un número pequeño de modelos (5), mientras que Sedepecc!! considera un número mayor (23).

Conclusiones

Se implementó de manera satisfactoria una herramienta de regionalización estadística basada en el método de Fiabilidad del Ensamble Ponderado, para integrar en un solo dato proyecciones de 23 modelos de circulación general acoplados para México, para una malla regionalizada de 50 × 50 km, aproximadamente.

La base de datos generada y a la que se accede a través de un sistema de extracción

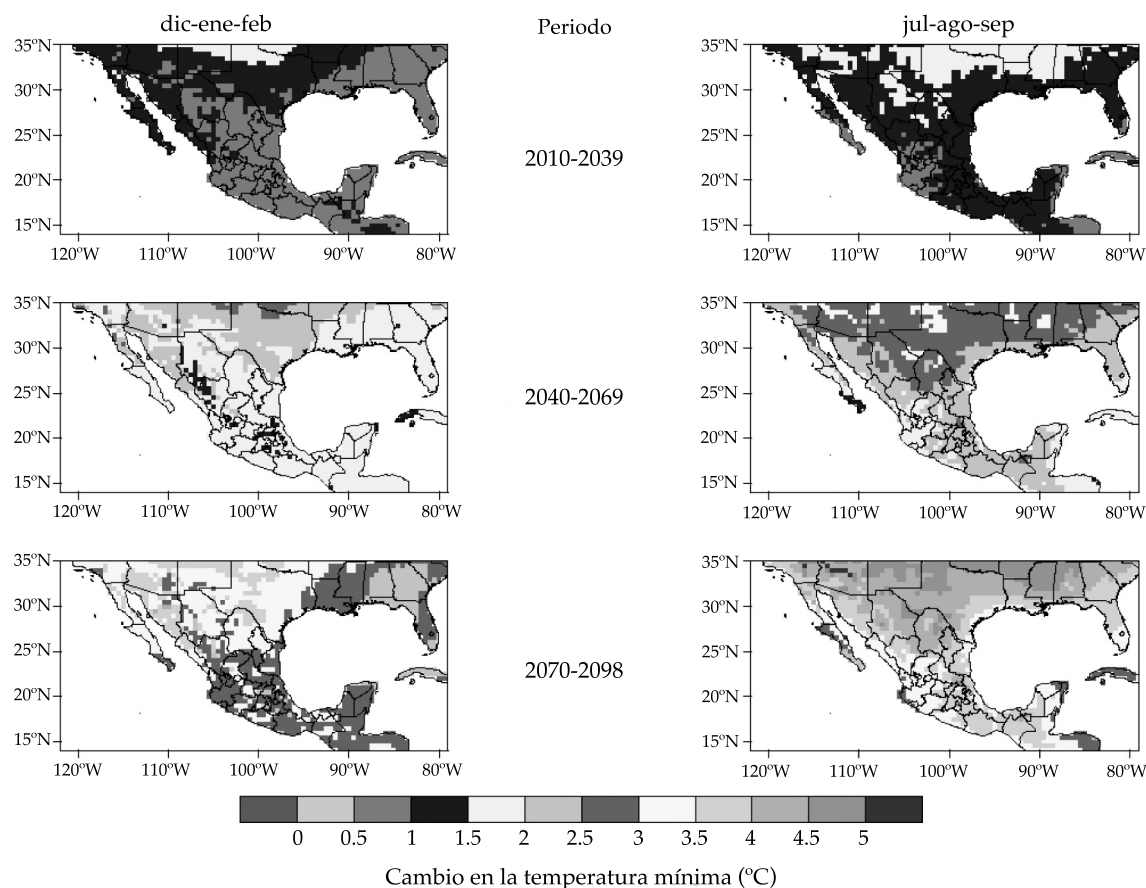


Figura 9. Cambio de temperatura mínima promedio (°C) estimada por los CGCMs y regionalizada a través de FEP para el escenario SRES-A2, en relación con el periodo 1961-1990. Las anomalías están dadas para los meses de invierno (izquierda) y verano (derecha), y durante los periodos de 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2098.

de proyecciones de cambio climático, desarrollado para México, puede ser de gran utilidad en estudios de impacto climático tanto para los sectores productivos como para el agropecuario.

El sistema informático desarrollado permite poner al alcance del usuario no especializado la información de proyecciones climáticas de México, facilitando la extracción de datos de la precipitación y temperatura para los escenarios de emisiones A1B y A2 durante el presente siglo, como fue aplicado al distrito de riego 075, a fin de obtener la variabilidad de la precipitación proyectada

durante el presente siglo. Lo anterior es de suma importancia para cuantificar el impacto del cambio climático en los procesos fisiológicos de los cultivos, como son la evapotranspiración, la fotosíntesis y la respiración de los cultivos.

El análisis de las anomalías proyectadas para la segunda mitad del presente siglo en México presenta un incremento en temperatura y menor precipitación en casi todo el país. Se observa que el cambio de la temperatura media es mayor para el verano que para el invierno, acentuándose para finales de siglo, donde se observan valores

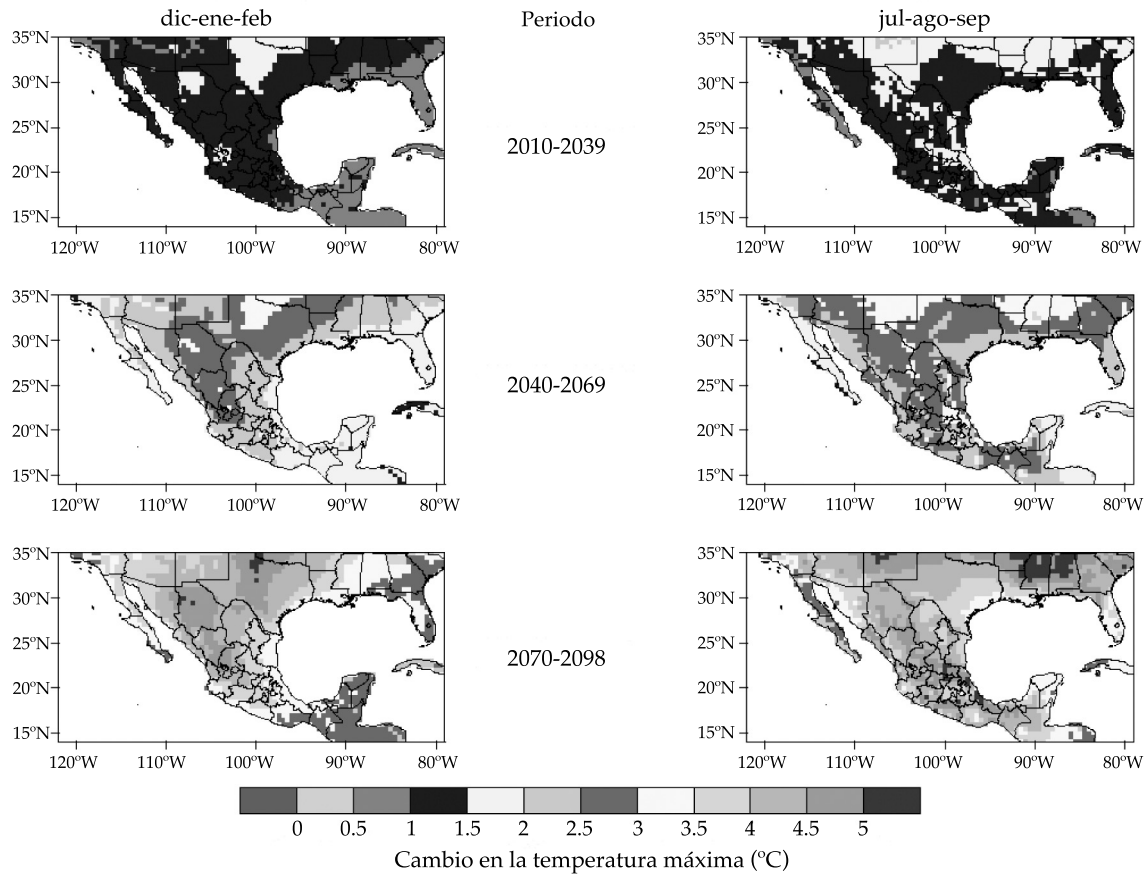


Figura 10. Cambio de temperatura máxima promedio (°C) estimada por los CGCMs y regionalizada a través de FEP para el escenario SRES-A2, en relación con el periodo 1961-1990. Las anomalías están dadas para los meses de invierno (izquierda) y verano (derecha), y durante los periodos de 2010-2039 (arriba), 2040-2069 (en medio) y 2070-2098 (abajo).

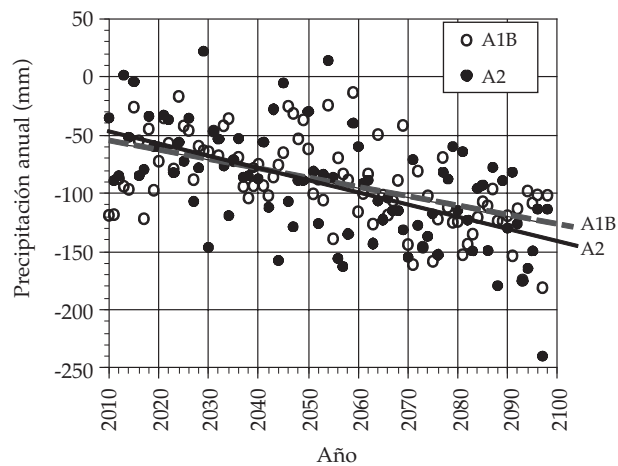


Figura 11. Anomalías en la precipitación anual del DR-075 y líneas de tendencia para los escenarios de emisiones A1B y A2.

por arriba de los 5 °C para algunas regiones en el norte y centro sur del país. Las mayores reducciones de precipitación se presentarán durante el invierno en la zona occidental del país, sin embargo presentan poca variación para el verano en esta zona. Es notable que los únicos valores positivos (incremento de precipitación) se detectaran para una pequeña región localizada entre Coahuila y Durango.

Recibido: 07/12/11

Aceptado: 12/08/12

Referencias

- CASTRO, C.L., PIELKE, R.A., and LEONCINI, G. Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). *J. Geophys. Res.* Vol. 110, 2005, D05108, doi:10.1029/2004JD004721.
- CI:GRASP. *The Climate Impacts: Global and Regional Adaptation Support Platform (ci:grasp)* [on line]. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety of the Federal Republic of Germany. Available at: <http://cigrasp.pik-potsdam.de/>.
- FNOC. *Fleet Numerical Oceanographic Center's Numerical Environmental Products Manual*. Vols. I and II. Monterey, USA: Fleet Numerical Oceanographic Center, 1986, 214 pp.
- GIORGI, F. and FRANCISCO, R. Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM. *Climate Dyn.* Vol. 16, 2000, pp.189-182.
- GIORGI, F. and MEARN, L.O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) method. *J. Climate*. Vol. 15, 2002, pp. 1141-1158.
- IPCC. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A., directores de la publicación. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, 104 pp.
- IPCC. *Escenarios de emisiones. Resumen para responsables de políticas. Informe Especial del Grupo de trabajo III del IPCC*. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000, 21 pp.
- IRI. *CPT tutorial, 2009* [on line]. International Research Institute for Climate and Society, 2009. Available at: <http://portal.iri.columbia.edu/portal/server.pt>.
- MAGAÑA, V. y CAETANO, E. *Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo y para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del Sistema: Cambio Climático por Estado y por Sector*. INE/A1-006/2007. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología, 2007, 41 pp.
- MAGAÑA, V., ZERMEÑO, D., and NERI, C. Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*. Vol 51, 2012, pp. 171-184.
- MITCHELL, T.D. and JONES, P.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*. Vol. 25, No. 6, May, 2005, pp. 693-712.
- MONTERO, M.J. y PÉREZ, J.L. Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Martínez, P. y Aguilar, A. (editores). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008, pp. 11-21.
- OJEDA-BUSTAMANTE, W., SIFUENTES-IBARRA, E., ÍÑIGUEZ-COVARRUBIAS, M. y MONTERO-MARTINEZ, M.J. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*. Vol. 45, núm. 1, 2011, pp. 1-11.
- PIELKE SR., R.A. and WILBY, R.L. Regional Climate Downscaling: What's the Point? *EOS Trans. AGU*. Vol. 93, No. 5, 2012, pp. 52-53.
- ROSENZWEIG, C. and DANIEL, M.M. Agriculture. *The Potential Effects of Global Change on the United States*. Chapter 6. Smith, J.B. and Tirpak, D.A. (editors). EPA-230-05-89-050. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, 1989, pp. 89-117.
- SEAGER, R., TING, M., HELD, I., KUSHNIR, Y., LU, J., VECCHI, G., HUANG, H., HARNIK, N., LEETMAA, A., LAU, N., LI, C., VÉLEZ, J., and NAIK, N. Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America. *Science*. Vol. 316, 2010, pp. 1181-1184.
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., ALLEY, R.B., BERNTSEN, T., BINDOFF, N.L., CHEN, Z., CHIDTHAISONG, A., GREGORY, J.M., HEGERL, G.C., HEIMANN, M., HEWITSON, B., HOSKINS, B.J., JOOS, F., JOUZEL, J., KATSOV, V., LOHMANN, U., MATSUNO, T., MOLINA, M., NICHOLLS, N., OVERPECK, J., RAGA, G., RAMASWAMY, V., REN, J., RUSTICUCCI, M., SOMERVILLE, R., STOCKER, T.F., WHETTON, P., WOOD, R.A., and WRATT, D. *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., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L. (editors). Cambridge/New York: Cambridge University Press, 2007, 74 pp.

WILBY, R.L. and FOWLER, H.J. Regional climate downscaling. Chap. 3. In *Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources.* Fung, C.F., López, A., and New, M. (editors). Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2010, pp. 34-85.

Abstract

MONTERO-MARTÍNEZ, M.J., OJEDA-BUSTAMANTE, W., SANTANA-SEPÚLVEDA, J.S., PRIETO-GONZÁLEZ, R. & LOBATO-SÁNCHEZ, R. Query system for regionalized climate change projections for Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 2, April-June, 2013, pp. 113-128.

Coupled general circulation models enable projecting future weather, but because there is no single model, several models are assembled. This work used a statistical method to obtain a set using 23 general circulation models with a confidence-weighted set algorithm that takes into account two confidence criteria: the performance of the model in reproducing the current climate and the convergence of projected changes among selected models. The data for precipitation and maximum and minimum surface temperatures were regionalized, with SRES-A1B and SRES-A2 scenarios for the 21st century, and the spatial resolution was increased to a regular mesh of $0.5 \times 0.5^\circ$ for Mexico. To facilitate the handling of these results, a system was developed—Sedepecc—which contains a database with the generated projections and presents them through a user-friendly interface. The analysis of projected anomalies for the current century in Mexico indicates an overall increase in temperature and a decrease in precipitation in the country. The results indicate that the change in temperature will be greater during summer than during winter, and highlights that for the last three decades of the current century projected values are over 5°C for some regions in central Mexico. As an application case for the system, climate change projections were generated for Irrigation District 075, located in northern Sinaloa State, Mexico.

Keywords: global warming, coupled general circulation models, set of climate scenarios, irrigation districts, scale-reduction techniques, informatics systems.

Dirección institucional de los autores

Dr. Martín José Montero Martínez

Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional
Avenida Observatorio 192, Colonia Observatorio,
Delegación Miguel Hidalgo
11860 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +(52) (55) 2636 4646
Fax: +(52) (55) 2636 4605
martin.monterom@conagua.gob.mx

Fax: +(52) (777) 329 3683
ssantana@tlaloc.imta.mx

Dr. Ricardo Prieto González

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +(52) (777) 329 3600, extensión 825
Fax: +(52) (777) 329 3683
rprieto@tlaloc.imta.mx

Dr. René Lobato Sánchez

Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional
Avenida Observatorio 192, Colonia Observatorio,
Delegación Miguel Hidalgo
11860 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +(52) (55) 2636 4657
Fax: +(52) (55) 2636 4605
rene.lobato@conagua.gob.mx

Dr. Waldo Ojeda-Bustamante

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +(52) (777) 329 3600, extensión 445
Fax: +(52) (777) 329 3658
wojeda@tlaloc.imta.mx

Dr. Julio Sergio Santana Sepúlveda

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +(52) (777) 329 3600, extensión 826