

ARTICULO DE INVESTIGACION

Servicios ambientales hidrológicos bajo escenarios de cambio climático en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo

Hydrologic environmental services under climate change scenarios in the “El Chico” National Park, Hidalgo, Mexico

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas, Jesús David Gómez-Díaz
y Juan Ángel Tinoco-Rueda*

RESUMEN

Los servicios ambientales que proveen los ecosistemas están en función, entre otros aspectos, de las condiciones climáticas predominantes en un determinado lugar, así como de la estructura y composición de los tipos de vegetación. Por lo anterior, el principal objetivo del presente estudio fue simular y cuantificar los impactos que un posible cambio climático puede ejercer sobre la regulación hídrica y la capacidad de recarga de acuíferos en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. Se realizó la modelación de la distribución geográfica de las variables temperatura y precipitación tomando como periodo base 1961-1990 y se aplicaron las razones de cambio obtenidas de los modelos de cambio climático norteamericano e inglés para el escenario A2 y los años 2020 y 2050. El comportamiento hídrico y la capacidad de infiltración en los diferentes escenarios se evaluaron a partir del balance de humedad obtenido con la metodología de Thornthwaite III modificado. Los resultados muestran una disminución en la recarga al acuífero aplicando el modelo inglés en 26% y 32% para los periodos 2020 y 2050, respectivamente. El modelo norteamericano estima un aumento en la infiltración de 6% y 22% para el 2020 y 2050, respectivamente. El periodo de crecimiento no presenta variaciones significativas en los escenarios estudiados. El modelo inglés prevé condiciones más drásticas, por lo cual debe de considerarse para fines de planear medidas de adaptación y mitigación, a fin de que se impida el deterioro del parque y que éste continúe otorgando servicios ambientales amenazados por el cambio climático.

PALABRAS CLAVE:

Cambio climático, escurrimiento, estado de Hidalgo, infiltración, servicios ambientales.

ABSTRACT

The environmental services provide ecosystems depend on predominant climate conditions of local scales, as well as in the vegetation structure and composition. The main goal of the present study was to simulate and quantify the impacts that a possible climate change have affect on the hydrologic regulation and on the water infiltration capacity in the National Park “El Chico”, Hidalgo. It was modeled the geographic distribution of climatic variables like temperature and precipitation, taking as baseline scenario the period of 1961-1990. It were applied the North American and English climate change models for the scenarios A2 and the years 2020 and 2050. The water balance was estimated according to the Thornthwaite modified or third version in order, to evaluate the hydrologic behavior and the infiltration capacity in different scenarios. The main results obtained by followins the english model show a decrease in aquifer recharge in 26% and 32% for 2020 and 2050, respectively. The North American model considers an increase in the infiltration rate of 6% and 22% for the 2020 and 2050, respectively. The growing period did not show significant variations in the studied scenarios. The

* Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, CP 56230, Texcoco, Edo. de México. Email: aimrivas@correo.chapingo.mx

English model pointed out more drastic conditions, because of it that must be considered to plan adoptive and mitigation measures to prevent park deterioration and it can continue providing environmental services deterioration that climate change put in risk.

KEY WORDS:

Climate change, runoff, Hidalgo State, infiltration, environmental services.

INTRODUCCIÓN

Muchas son las definiciones que se le han dado al concepto de servicios ambientales o ecosistémicos, aunque la mayoría hacen siempre referencia a términos de la *composición, estructura y función* de los ecosistemas. Dentro de un ecosistema, su *composición* se refiere a todo aquello que se encuentra dentro del área funcional (Meffe, 2002), como por ejemplo la composición genética, las poblaciones, las especies, las comunidades y los paisajes. Mientras que la *estructura* de un ecosistema se refiere a las especies contenidas dentro de éste, su masa y su arreglo (Westman, 1977), es decir, cómo están distribuidas en el espacio y tiempo. Algunos ejemplos son la estructura genética, de poblaciones y de los hábitats, así como el comportamiento del paisaje son algunos ejemplos.

La *función* de un ecosistema es la forma en que los componentes del sistema interactúan (Westman, 1977). Se refiere al qué es lo que realizan, por ejemplo, los procesos genéticos, los procesos demográficos, las interacciones específicas así como los procesos y disturbios dentro del paisaje. Es la parte dinámica del ecosistema, por lo que sus procesos han sido entendidos como los servicios que presta el ecosistema o *servicios ambientales* (Westman, 1977; MA, 2003). El hombre obtiene algún tipo de beneficio a partir de estas funciones a cualquier escala, la mayoría no tiene

precios de mercado y aún no pueden ser reemplazos por algún tipo de tecnología (Costanza, 1997).

Las primeras referencias sobre la función y los servicios de los ecosistemas datan de mediados de los años sesentas y principios de los setentas (De Groot, *et al.*, 2002). A partir de entonces han aparecido una gran cantidad de publicaciones sobre el beneficio que los ecosistemas naturales proveen a la sociedad humana (Daily, 1997; Costanza, *et al.*, 1997; de Groot, *et al.*, 2002 y Lobo, 2001). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2003) los define como los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas ponen a disposición de la sociedad, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable.

Los beneficios que ofrecen los bosques a nivel local, regional y en algunos casos a nivel mundial, derivan de su valor como fuente de abastecimiento de agua, centros de diversidad biológica, origen de diversos productos madereros y no madereros, lugar de recreación y estabilizadores del suelo frente a los procesos erosivos. En general, los bosques se han asociado con diversos servicios ambientales al nivel de cuenca hidrológica, destacando entre otros: 1) regulación de los flujos de agua, 2) conservación de la calidad del agua, 3) control de la erosión y sedimentación, 4) reducción de la salinización del suelo, 5) regulación del nivel freático y, 6) conservación de hábitats acuáticos (García *et al.*, 2004; Manson, 2004 y Pattanayak, 2004). Myers (1997) señala que los bosques, por su particular estructura y abundante follaje, experimentan un "efecto esponja" al absorber la humedad proveniente de las precipitaciones y liberarla gradualmente a las corrientes hídricas. El mismo autor señala que un bosque cerrado puede interceptar 35% de la precipitación, mientras que un

bosque abierto menos del 20% y una plantación forestal sólo 12%. La mayor parte del agua que es interceptada por las hojas y el follaje forestal, disminuye su velocidad y reduce su tamaño, lo que hace posible que ésta caiga con menor fuerza y se evite así el desprendimiento del suelo, permitiendo una mejor percolación o una escorrentía gradual hacia las corrientes de agua.

Uno de los principales servicios ambientales que ha influido en el éxito o fracaso de las sociedades es el abastecimiento de agua potable, debido a su importancia tanto para el consumo humano como para la producción de alimentos. Sin embargo, el aumento de las áreas urbanas, la deforestación y el cambio de uso de suelo han provocado una disminución significativa en la calidad y cantidad de dichos servicios, en especial el abastecimiento de agua (Maderrey y Carrillo, 2005), por lo que se perfila como uno de los retos ambientales futuros más importantes para el ser humano (Manson, 2004; IPCC, 2007).

Aunado a los factores antes mencionados, el cambio climático es otra amenaza a la estabilidad en la distribución del agua en los ecosistemas (IPCC, 2007) ya que no se tiene un panorama específico de cuáles serán las consecuencias que un posible cambio en el sistema climático pueda ejercer sobre el medio ambiente. Sin embargo, se han realizado simulaciones que pronostican resultados con un alto grado de incertidumbre, como por ejemplo largos periodos de sequía o incremento en la cantidad y periodo de lluvias (IPCC, 2007).

En este sentido, Arnell (1999) simuló bajo el modelo HadCM3, los cambios en el escurrimiento medio anual para el año 2050 para todo el mundo. En dicho trabajo se presenta que México se encuentra en rangos de van de menos

250 a más de 25 mm/año, teniendo la mayor parte del territorio nacional zonas con cambios negativos. Rosegrant *et al.* (2002) establece que para el año 2025 la extracción mundial de agua para uso industrial, doméstico y ganadero aumentará en más del 50%, lo que limitará de manera considerable el riego para la producción de alimentos. También en México, Manson (2004) revisó los servicios hidrológicos brindados por estos ecosistemas, incluyendo la captación de agua y la prevención de ciclos de inundación y sequía, así como la conservación de los suelos, la regulación del clima regional y la reducción del azolve de los cauces de los ríos, proponiendo finalmente el establecimiento de esquemas de pago por servicios ambientales como un mecanismo prometedor para aumentar la cobertura boscosa y favorecer el manejo sustentable de los recursos naturales en el país.

Es por lo anterior que surge la necesidad de evaluar el posible comportamiento de los servicios ambientales hidrológicos que proveen los ecosistemas forestales frente a escenarios de cambio climático, ya que de su análisis se contará con más y mejores elementos para la toma de decisiones desde el presente, pero enfocado al mantenimiento de dicho servicio en un futuro no muy lejano. Para ello, en la presente investigación se planearon los siguientes objetivos:

- 1) Elaborar cartografía actualizada de las variables climáticas de temperatura y precipitación en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

- 2) Obtener y aplicar las razones de cambio sugeridas por los modelos de cambio climático norteamericano (GFDL-R30_A2) e inglés (HadCM3_A2) para el escenario socioeconómico A2 y los periodos 2020 y 2050.

3) Evaluar el posible comportamiento del servicio ambiental hidrológico mediante balances de humedad en el suelo, aplicando la metodología de Thornthwaite III modificado y considerando condiciones actuales y futuras de cambio climático.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El Parque Nacional “El Chico”, fue decretado en 1982 como área natural protegida con una superficie de un poco más de 2 700 hectáreas. Se ubica al centro del estado de Hidalgo (Figura 1) e incluye parte de los municipios de Mineral del Chico, Mineral del Monte y Pachuca de Soto, la capital del estado. Presenta un rango altitudinal que va de los 2 000 a

poco más de 3 000 metros sobre el nivel del mar, derivando en algunas zonas con fuertes pendientes y paisajes exuberantes. De acuerdo con el programa de manejo (CONANP, 2006), el parque “tiene especial relevancia dado que el macizo montañoso constituye una mínima fracción del parteaguas que separa a los sistemas hidrológicos correspondientes a la gran cuenca del río Pánuco y a la cuenca del Valle de México”. En este sentido, el parteaguas corre en sentido este-oeste y supera altitudes de 3 050 msnm. La vertiente orientada hacia el norte abarca la mayor superficie del parque, 2 273 hectáreas que significan 83%, mientras que la expuesta al sur comprende 466 hectáreas, alrededor del 17% respecto al área. La vegetación predominante (COEDE, 2007) es de bosque de oyamel (1 856 ha), bosque de

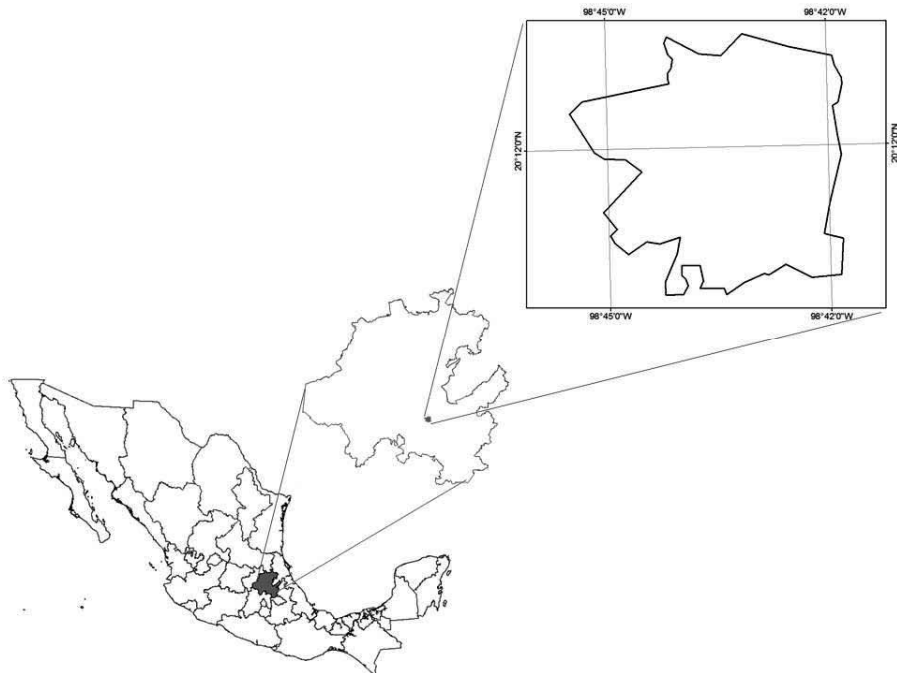


Figura 1. Localización del área de estudio.

pino-encino (403 ha), bosque de oyamel-encino (95 ha), bosque de tlaxcal o táscate (63 ha), pastizal (46 ha), bosque de cedro (27 ha) y bosque de encino (25 ha). El mismo autor señala que la flora está constituida por 545 especies, 264 géneros y 73 familias, de las cuales 4 especies son sujetas a protección especial, una especie amenazada y otra en peligro de extinción.

Delimitación de áreas de influencia climática

Las áreas de influencia climática son unidades geográficas que poseen valores de temperatura media anual y precipitación media anual únicos, se construyen a partir de isoyetas e isotermas medias anuales, para lo cual, primero se seleccionaron las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio y en áreas aledañas para ser utilizadas en la elabo-

ración de la cartografía (Figura 2). La búsqueda de información climática y su condensación se llevó a cabo con ayuda de las normales climatológicas publicadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2000). Se obtuvieron los datos promedio mensual y anual de precipitación y temperatura para el periodo 1961-1990, conformando éste el año base. Para el trazo de las isoyetas se utilizó la metodología propuesta por Gómez *et al.* (2008) que utiliza como información base espaciomapas y/o imágenes de satélite, modelos digitales de elevación, curvas de nivel y los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica ArcView v.3.2 se sobrepusieron estos productos cartográficos y se trazaron las isoyetas tomando en cuenta la condición de la vegetación como un indicador de la cantidad de precipitación, la dinámica de circulación

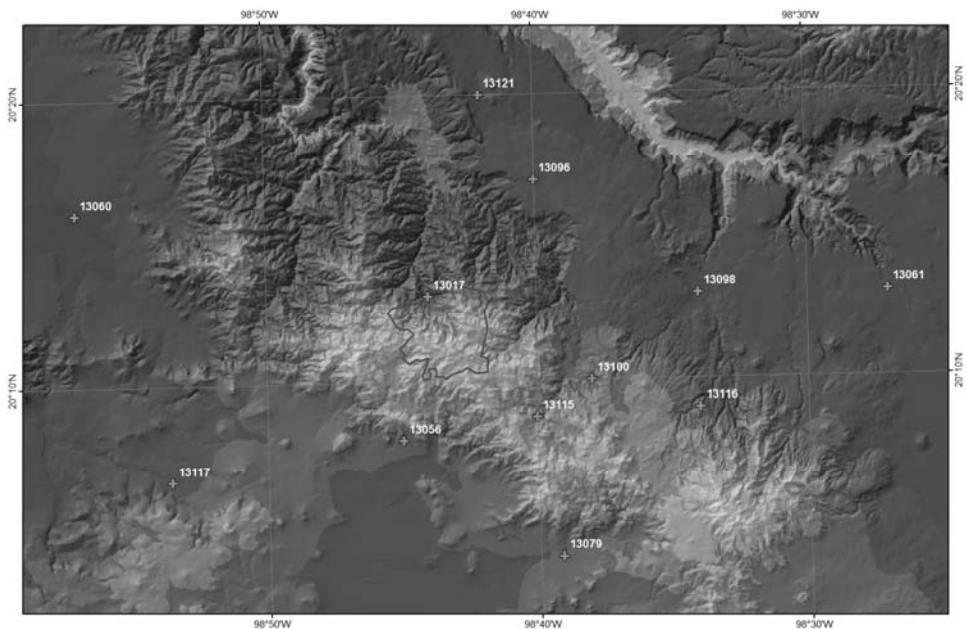


Figura 2. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas.

de los vientos con los que se asocia la entrada de humedad a la zona y los diferentes fenómenos meteorológicos que afectan al Parque a lo largo del año. Lo anterior para conformar el mapa de precipitación media anual y mensual. Para obtener las isotermas se crearon doce modelos mensuales y uno anual de regresión lineal simple para observar el comportamiento de la temperatura con referencia a la altitud (Gómez *et al.*, 2007 y 2008), utilizando un grupo de estaciones meteorológicas ubicadas en la misma región climática de la zona de estudio. Aplicando los modelos obtenidos se trazaron las isolíneas de temperatura por cada rango altitudinal, conformando así los doce mapas de temperatura mensual y anual.

Finalmente, se obtuvieron las áreas de influencia climática (AIC) al sobreponer, mediante el programa de Sistemas de Información Geográfica ArcView v.3.2, las isoyetas con las isotermas anuales. A cada una de las AIC resultantes se le asignó su correspondiente base de datos de temperatura y precipitación mensual.

Aplicación de modelos de cambio climático

A la base de datos de las áreas de influencia climática obtenidas en el paso anterior, se les aplicaron las razones de cambio a la temperatura (°C) y precipitación (%) obtenidos por los modelos generales de circulación (MGC) norteamericano (GFDL-R30) e inglés (HadCM3) para los periodos 2020 y 2050, de acuerdo al escenario socioeconómico A2, en el que se considera que el desarrollo de la economía global estará basada más en criterios de obtención de beneficios económicos que en la preservación del medio ambiente y que seguirá la disparidad entre los países desarrollados y los en vías de

desarrollo. Las tasas de cambio de los MGC fueron obtenidas del Canadian Institute for Climate Studies (CICS, 2007).

Se decidió aplicar los modelos GFDL-R30 y HadCM3 debido a que establecen escenarios diferentes. En la variable temperatura, ambos modelos predicen incrementos, sin embargo, en la variable precipitación el modelo GFDL establece aumentos en la cantidad de lluvia, y por el contrario, el modelo HadCM establece mermas en esta misma variable (Gómez *et al.* 2007, IPCC, 2007). Por su parte, el escenario A2 se eligió para esta investigación, el cual se basa en el supuesto de que el desarrollo global seguirá una tendencia tal y como se presenta actualmente, diferenciándose del escenario B, el cual establece que el desarrollo global se presentará bajo un enfoque conservacionista del medio ambiente (IPCC, 2007).

Cálculo del balance de humedad en el suelo

El balance se realizó utilizando la metodología de Thornthwaite (Dunne y Leopold, 1978) modificada versión III, la cual fue adaptada en la década de los 90's por países de la Unión Europea para contar con mayor información del impacto del cambio climático en sus regiones (Kenny y Harrison, 1992), así como incorporada por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación, en países afectados por sequía grave y desertificación, para medir en todo el mundo las zonas áridas y semiáridas con un mismo parámetro (Monterroso y Gómez, 2003; Gómez *et al.*, 2007 y WRS, 2004).

Como lo señalan Gómez *et al.* (2007) el sistema incluye la aplicación del concepto del balance hídrico, que

consiste en la relación entre el agua aportada por la precipitación y la requerida por la vegetación en sus funciones de evaporación y transpiración (Dunne y Leopold, 1978). El sistema de Thornthwaite considera, para la clasificación climática, la eficiencia de los parámetros meteorológicos de precipitación y temperatura. La evaluación del primero se determina a través de un balance de humedad con la finalidad de determinar qué tan seco o qué tan húmedo es el clima en relación con el crecimiento de las plantas. En la evaluación del segundo parámetro se estima qué tan caliente o qué tan frío es el clima para el crecimiento de las plantas.

El sistema considera, además, la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, que es la cantidad máxima de agua disponible en las capas del suelo ocupadas por las raíces y que puede ser tomada por las mismas cuando la planta lo requiera para realizar sus funciones. En su estimación se considera la cantidad de humedad en el suelo a partir de la situación del punto de marchitez permanente y hasta capacidad de campo.

El balance de agua por el método de Thornthwaite modificado no considera a la interceptación (INT), entendida como el volumen de agua de lluvia que no alcanza a tocar el suelo por ser detenida por el follaje, ramas y troncos. Para evaluar este parámetro se siguió lo propuesto por Jiménez (2005) y lo observado por Flores *et al.*, (2005), quienes señalan que en promedio los bosques tropicales interceptan de 10 a 30% del total de la lluvia, mientras que para los bosques templados el rango se estima de un 10 a 20%, en promedio. Bajo este entendido se aplicó un valor intermedio de quince por ciento de interceptación de agua de lluvia para toda la cuenca.

Periodos de crecimiento

Además del balance hídrico mensual, se evaluó el posible impacto que se tendría bajo escenarios de cambio climático en el comportamiento del periodo de crecimiento (PECRE), definido por la FAO (1978) como el número de días durante el año en los que existe disponibilidad de agua y una temperatura favorable para el desarrollo de los cultivos. Lo anterior permite evaluar el periodo continuo del año durante el cual la cantidad de precipitación es mayor que la mitad de la evapotranspiración potencial, más un número determinado de días requeridos para evaporar una cantidad asumida de agua del suelo almacenada al final de las lluvias, que no puede ser mayor a 100 milímetros.

RESULTADOS

Variables climáticas detalladas

En la tabla 1 se presenta el listado de las estaciones meteorológicas (SMN, 2000) que se encuentran en el área de influencia del Parque. A partir de los valores mensuales de temperatura, y de acuerdo con Gómez *et al.* (2008) se calcularon modelos de regresión lineal simple para cada mes (Tabla 2), estableciendo la relación de la variación de la temperatura a partir del cambio en la altitud media sobre el nivel del mar. Sobre el mapa de curvas de nivel se aplicaron los modelos estimados para obtener de manera gráfica los mapas de temperaturas medias mensuales y el anual (Figura 3a). Se observa que las temperaturas promedio anuales dentro del parque oscilan entre los 11 y los 16°C, siendo menores en las partes altas del parque. El valor máximo de temperaturas, entre 15 y 16°C, ocupa una pequeña porción del área natural y se encuentra en las partes bajas hacia los límites de la zona norte de éste.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas en el área de influencia del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

CLAVE (SMN)	NOMBRE	LATITUD (N)	LONGITUD (W)	ALTURA (msnm)
13017	Mineral del Chico	20,21667	-98,73333	2329
13056	Pachuca	20,13333	-98,75000	2483
13060	Actopan	20,26667	-98,95000	1991
13061	Alcholoya	20,21667	-98,45000	2100
13079	Presa El Girón	20,06440	-98,65240	2439
13096	Atotonilco	20,28333	-98,66667	2080
13098	Huasca	20,21667	-98,56667	2054
13100	Omitlan	20,16667	-98,63333	2540
13115	Real del Monte	20,14588	-98,66737	2638
13116	El Sembo	20,15000	-98,56667	2435
13117	Tlaxiaca	20,11119	-98,89247	2336
13121	Santa María Amajac	20,33333	-98,70000	1975

Tabla 2. Modelos de regresión simple obtenidos para temperatura.

MES	MODELO
Enero	$T = -0,0048h + 23,096$
Febrero	$T = -0,0051h + 24,949$
Marzo	$T = -0,0054h + 27,692$
Abril	$T = -0,0061h + 31,194$
Mayo	$T = -0,0072h + 34,693$
Junio	$T = -0,0074h + 34,921$
Julio	$T = -0,0068h + 32,503$
Agosto	$T = -0,0067h + 32,061$
Septiembre	$T = -0,0065h + 31,379$
Octubre	$T = -0,0062h + 29,508$
Noviembre	$T = -0,0055h + 26,434$
Diciembre	$T = -0,0049h + 23,780$
Anual	$T = -0,0060h + 28,719$

En lo que se refiere a precipitación (Figura 3b), el valor medio anual de las áreas de influencia climática fue 881,1 mm, con régimen de lluvias de verano y presencia de canícula ligera en el mes de agosto. El porcentaje de precipitación invernal respecto a la total anual es inferior a 5%. Un aspecto importante es que los vientos dominantes en la mayor parte de año provienen del noreste, aunque en la época seca son frecuentes también los que soplan del noroeste. Durante casi todo el año la zona está sujeta a la acción de vientos moderadamente fuertes por la tarde.

La región de estudio corresponde a una zona de barlovento, donde los vientos provenientes del noreste se asocian con el ascenso forzado del aire sobre las laderas orientales del macizo montañoso y con la formación de nubes al enfriarse el aire por debajo del punto de condensación del vapor de agua. Asimismo, se presenta la formación de nubes, sobre todo cuando el gradiente de presión es considerable entre la zona del

Golfo de México y el altiplano central que establece el flujo de los vientos alisios (Tinoco, 2005).

Las zonas con mayor precipitación se presentan hacia el sur del parque, sobre el macizo montañoso que lo forma, observándose el máximo entre los 1 100 y 1 200 milímetros anuales, en promedio. Por su parte, el rango de menor precipitación, aquel entre los 700 y 800 milímetros anuales, se ubica hacia las partes más bajas de la montaña y hacia la porción norte del parque.

Aplicación de los modelos de cambio climático

Los resultados de aplicar las tasas de cambio sugeridas por los modelos generales de circulación (MGC) a la temperatura media anual del escenario base (1961-1990) se presentan en la tabla 3. Se observó un incremento, en promedio anual de 0,9°C según el modelo GFDL-R30 al

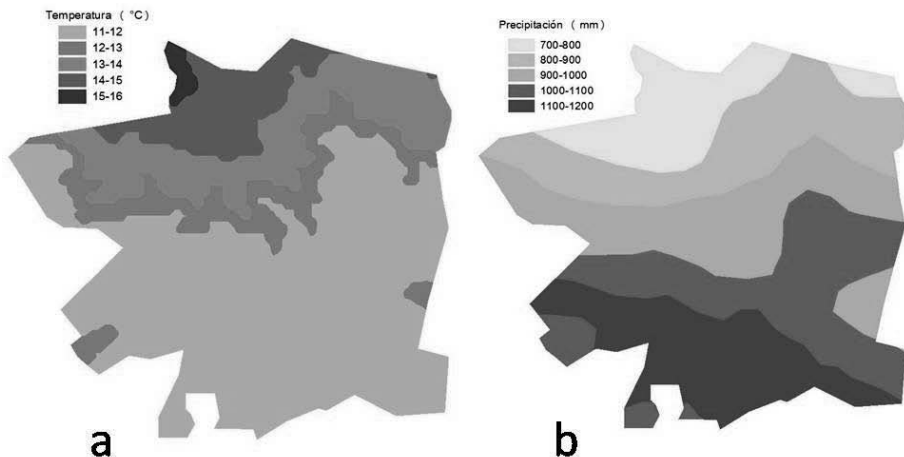


Figura 3. Se muestra en a) la temperatura media anual (°C) y en b) la precipitación promedio anual (mm) obtenida para el parque.

Tabla 3. Temperatura (°C) para el año base y bajo los cuatro escenarios de cambio climático evaluados.

ESCENARIO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
BASE													
1961-1990	10,0	10,2	13,4	14,9	15,5	14,5	13,7	13,4	13,4	12,2	11,3	10,5	12,8
HadCM3													
A2-2050	13,1	12,2	15,6	16,6	17,6	16,7	16,3	16,2	16,3	14,9	14,5	12,8	15,2
HadCM3													
A2-2020	11,4	10,2	13,9	16,0	16,6	15,7	15,1	15,1	14,6	13,0	12,3	11,4	13,8
GFDL-R30													
A2-2050	11,8	12,0	15,8	17,1	16,8	15,9	15,2	14,6	14,7	13,4	13,1	12,2	14,4
GFDL-R30													
A2-2020	11,0	11,2	14,8	16,3	16,3	15,5	14,7	14,1	13,9	12,7	12,6	11,3	13,7

Tabla 4. Precipitación (mm) para el año base y bajo cuatro escenarios de cambio climático evaluados.

ESCENARIO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
Base													
1961-1990	16,8	16,1	16,3	38,0	72,9	146,3	146,3	132,0	170,5	83,9	27,0	14,9	881,0
GFDL													
A2-2020	14,4	16,3	21,3	59,2	84,7	155,1	192,1	160,5	171,5	76,2	39,7	12,8	1003,8
GFDL													
A2-2050	12,8	14,8	23,2	57,4	130,6	150,5	210,8	121,1	198,2	72,8	31,0	13,7	1036,9
HADLEY													
A2-2020	15,4	15,3	17,5	37,0	63,7	142,4	127,8	115,3	140,6	81,9	31,7	17,5	806,1
HADLEY													
A2-2050	15,3	15,5	18,9	46,2	73,8	155,3	140,5	100,6	120,1	88,9	38,4	18,1	831,6

año 2020 y de 1,6°C según el mismo modelo para el año 2050. La marcha anual de la temperatura bajo el mismo modelo se comporta de manera similar que en el escenario base, ya que la temperatura promedio más alta se presenta en el mes de mayo con 16,3°C para el año 2020. Sin embargo, para el año 2050 el mes de abril será el más caluroso con 17,1°C de acuerdo con el modelo ya señalado. Por su parte, bajo el modelo HadCM3 se presentará un aumento, en promedio, en la temperatura media anual de 1°C para el año 2020 y de 2,4°C para el 2050. El mes de mayo se mantendrá como el más caluroso con 16,6°C y 17,6°C para los años 2020 y 2050.

En cuanto a la precipitación media anual (Tabla 4), se observa un aumento en los dos periodos bajo el modelo norteamericano, 14% para el año 2020 y 17,7% para el año 2050. Bajo condiciones actuales, el mes con la mayor cantidad de lluvia es septiembre (170 mm) pero bajo el modelo GFDL-R30, el mes de julio será en donde se presente la mayor precipitación pluvial con 192,1 mm para el año 2020 y 210,8 mm hacia el año 2050. El modelo inglés, por el contrario, muestra una disminución en los valores de precipitación media anual en comparación con las condiciones actuales, ya que para el año 2020 supone que disminuye en 8,5% y para el 2050 en 5,6%. Bajo este escenario, el mes de junio será el que registre la mayor cantidad de lámina precipitada con 142,5 mm en el 2020 y 155,3 mm para el 2050.

Balance de humedad en el parque

Los datos obtenidos anteriormente, junto con los valores de latitud y los tipos de vegetación, sirvieron para obtener las variables del balance de humedad en el suelo: evapotranspiración (ET), escurrimiento (ESC), infiltración (INF) e intercep-

ción (INT). Los resultados del balance hídrico general se presentan en la tabla 5.

El comportamiento de la evapotranspiración anual es a la alza bajo los dos modelos para ambos periodos de tiempo evaluados, ya que para el modelo GFDL-R30 se presenta un aumento de 3,6% en el año 2020 y de 6,2% para el año 2050. El modelo HadCM3 establece un incremento mayor. Para el periodo 2020 6,2%. Lo anterior se puede explicar debido al aumento de la temperatura sugerido por ambos modelos de cambio climático.

El escurrimiento por su parte presenta, al igual que la precipitación, cambios dependientes del modelo aplicado: con el norteamericano registra un aumento de 30,8% para el año 2020 y de 37,9% para el 2050. Por su parte, el modelo inglés registra una disminución de 25,6% en el volumen escurrido para el año 2020 y de 34,5% para el año 2050.

En lo que se refiere a la cantidad de infiltración anual, bajo el escenario base representa 6% del total de la lluvia observada para el periodo, es decir, un volumen de $1,48 \times 10^6$ m³ de agua (Figura 4). Los modelos de cambio climático sugieren que para el año 2020 estos valores disminuirán en 70% ,según el modelo inglés y 15% según el modelo norteamericano, observando volúmenes de $0,4 \times 10^6$ m³ y $1,26 \times 10^6$ m³ de agua, respectivamente. Para los escenarios al año 2050 la tendencia señalada por el modelo HadCM3 prevalece, al disminuir en 99%, lo que significa una pérdida de un volumen de $1,4 \times 10^6$ m³ de agua, para quedar en tan solo un volumen de $0,008 \times 10^6$ m³. El modelo GFDL-R30 para el año 2050 es el único que supone un incremento en la cantidad de volumen infiltrado de aproximadamente 30% más de agua. Entendiéndose lo anterior porque el mismo modelo sugiere mayor cantidad de lluvia precipitada para dicho periodo.

Tabla 5. Lámina de lluvia promedio anual y de las variables del balance de humedad para los cinco escenarios evaluados (mm/año).

ESCENARIO	AÑO	P	INT	ET	ESC	INF
BASE	1961-1990	881,1	132,1	432,2	264,6	52,2
HadCM3_A2	2020	806,5	120,9	474,3	195,1	16,5
GFDL-R30_A2		1004,2	150,6	463,6	346,1	43,9
HadCM3_A2	2050	832,0	124,8	533,7	173,4	0,1
GFDL-R30_A2		1037,4	155,5	446,7	365,0	70,2

Donde P=Precipitación, INT=Intercepción, ET=Evapotranspiración, ESC=Escurrimiento e INF=Infiltración

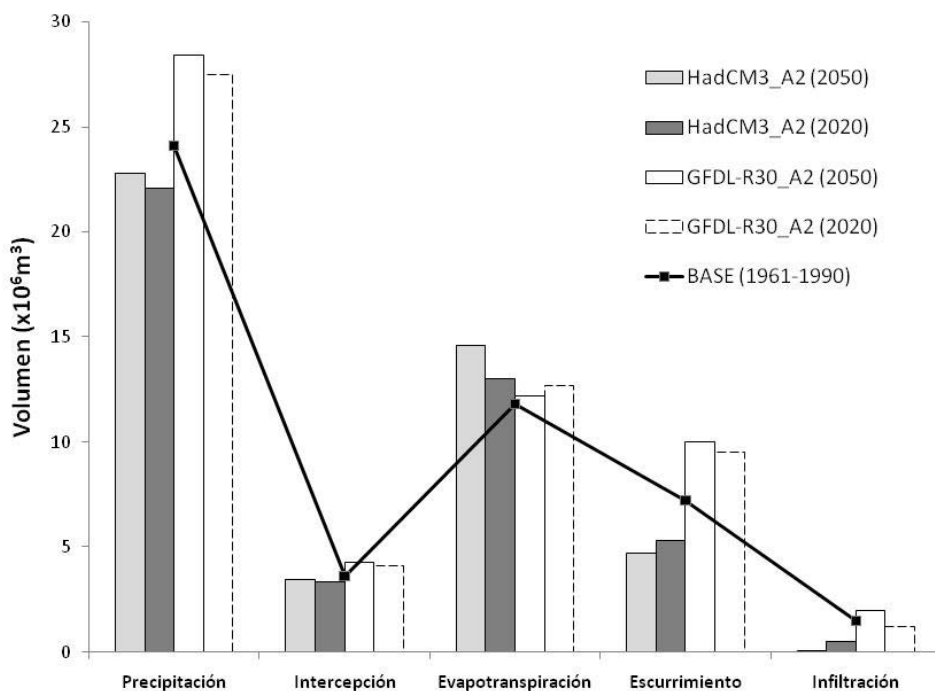


Figura 4. Volumen de agua (10^6 m^3) del balance hídrico para el escenario base y cuatro escenarios de cambio climático evaluados en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

Analizando la distribución mensual de las variables promedio de la zona (Figura 5a), para el año base se observa que en la precipitación existe una disminución de aproximadamente 20 milímetros en el mes de agosto respecto de los meses anteriores, junio y julio. Para el mes siguiente, es decir, septiembre, se presenta el máximo anual de precipitación con más de 160 milímetros de lluvia en el mes y aproximadamente 30 milímetros más que en agosto. Este fenómeno ha sido ampliamente descrito como un periodo de sequía intraestival o canícula. Para la región de estudio, se puede resumir el comportamiento de la precipitación señalando que el periodo de lluvias es de régimen de verano y el mes más húmedo presenta más de 10 veces la precipitación del mes más seco y ocurre en la mitad que es la más caliente del año y para este caso particular después de la canícula. Al aplicar los escenarios de cambio climático se observó un posible cambio en este comportamiento descrito.

Los cuatro escenarios de cambio climático aplicados (Figura 5b, 5c, 5d y 5e) sugieren que la canícula se seguirá presentando en la región de estudio en el mes de agosto. Sin embargo, los modelos apuntan a que el mes más húmedo ya no se presentará después de la canícula, sino antes de ésta, en el mes de junio (3 escenarios) o julio (1 escenario). Para el primer horizonte de tiempo al año 2020, los dos modelos sugieren un comportamiento muy similar de la canícula al observado en el año base.

Para los modelos aplicados al año 2050, el comportamiento de la canícula se anuncia más drástico. Para el modelo inglés representa una disminución de aproximadamente 60 mm en comparación con los meses que la antecedan (junio y julio), observándose un ligero incremento para el mes de septiembre de apenas 20 mm (Figura 5d). Éste repre-

sentará el escenario más radical para el balance hídrico, ya que el máximo de precipitación se presentará en los meses de junio y julio. El mes de agosto será de canícula, pero ésta no alcanzará los niveles de capacidad de infiltración observados en el año base. Por su parte, y para el mismo año, el modelo norteamericano (Figura 5e) sugiere la presencia de la canícula en el mes de agosto, con el mes más lluvioso en el mes de julio y con una posible elevación considerable de las lluvias en el mes de septiembre. Sin embargo, la canícula prevista presentará una disminución de aproximadamente 90 mm en comparación con el mes de julio y de 80 mm en comparación con el mes de septiembre, impactando también en el balance hídrico y la capacidad de infiltrar agua a los acuíferos, ya que las disminuciones observadas en el año base fueron de 20 y 30 mm, respectivamente.

En lo que se refiere a la evapotranspiración, el máximo observado en el escenario base se presenta en el mes de mayo con poco más de 77 mm, mientras que el mínimo se encuentra en febrero con aproximadamente 35 mm. Este comportamiento permanece para todos los escenarios de cambio climático aplicados, debiéndose a que después de la época de lluvias queda agua almacenada en el suelo durante la estación de invierno, además de la disminución en temperatura presentada en el mismo periodo, repercutiendo en valores inferiores de evapotranspiración. Conforme se acerca la época lluviosa y aumentan las temperaturas, la evapotranspiración también aumenta hasta el máximo en el mes de mayo.

El escurrimiento, por su parte, se presenta con valores máximos en el mes de septiembre con aproximadamente 80 mm, coincidiendo con el máximo de precipitación en el escenario base. Poco después de que inicia la época de lluvias

y al saturarse el suelo se inicia el proceso de escurrimiento, comprendiendo poco más de seis meses, desde el mes de junio y hasta diciembre, con valores muy pobres en el mes de enero. En los meses de febrero a junio no se aprecia escurrimiento. Al aplicar los escenarios de cambio climático la tendencia es muy parecida al escenario base, observándose que el mes de junio podría presentar un poco más de escurrimientos que los observados para el periodo base. El mes de septiembre continuará siendo el de mayor escurrimiento, dado que se ha cubierto la capacidad de almacenamiento de agua del suelo con la precipitación de junio, julio y agosto, aunque para los dos modelos del escenario 2020 se espera disminuyan a menos de 60 mm y según el modelo inglés para el 2050, a menos de 40 mm. El modelo norteamericano para el año 2050 sugiere que los valores sobrepasarán los 100 mm escurridos, debido a que se esperarán mayores lluvias después de la canícula en el mes de agosto.

En cuanto a la infiltración de agua, que es el objetivo central del presente estudio, el escenario base indica que se tienen ocho meses del año (octubre a mayo) con infiltración nula. Los restantes cuatro meses, dentro del periodo de lluvias, son donde se presenta la posibilidad de infiltrar agua. El mes de junio es donde se presenta la mayor cantidad de agua infiltrada con poco más de 50 mm, julio con aproximadamente 30 mm y los meses de agosto y septiembre con poco más de 10 mm en conjunto. Los valores en volumen de agua que esto representa ya fueron señalados en párrafos anteriores.

Para los escenarios futuros con cambio climático al año 2020 el comportamiento es similar, aunque el mes de agosto, donde se presenta la canícula,

disminuirá considerablemente la capacidad de infiltrar agua. El mes de junio seguirá siendo el de mayor infiltración, pero los valores se reducirán a poco menos de 40 mm, lo que representará una disminución del 35% de agua infiltrada.

Los escenarios de cambio para el año 2050 señalan comportamientos distintos entre sí y comparados con el escenario base. El modelo inglés señala que únicamente en dos meses del año se tendrá capacidad de infiltrar agua, el mes de junio con cerca de 50 mm y el mes de julio con poco más de 15 mm. Para el primero representa una disminución del 20% comparado con el mismo mes en el escenario base y para el segundo una disminución del 50%. De acuerdo con el modelo norteamericano, para el mismo año el periodo con capacidad de infiltrar agua aumentará, empezando en el mes de mayo, disminuyendo considerablemente en agosto y terminando en septiembre, posiblemente aumentando el volumen de agua infiltrada.

Periodos de crecimiento

Para el escenario base se encontró que el periodo de crecimiento inicia el 8 de abril y termina el 1 de diciembre, teniendo una duración de siete meses y 23 días. Los escenarios de cambio climático no sugieren modificaciones importantes en el PECRE. Al contrario, todos simulan un ligero aumento de este periodo. Para el año 2020, los modelos sugieren un aumento de cuatro y dieciocho días, de acuerdo con el modelo inglés y norteamericano, respectivamente. Por su parte, para el año 2050 los modelos apuntan a aumentar dieciséis y trece días, en comparación con el escenario base para el modelo inglés y el norteamericano, respectivamente.

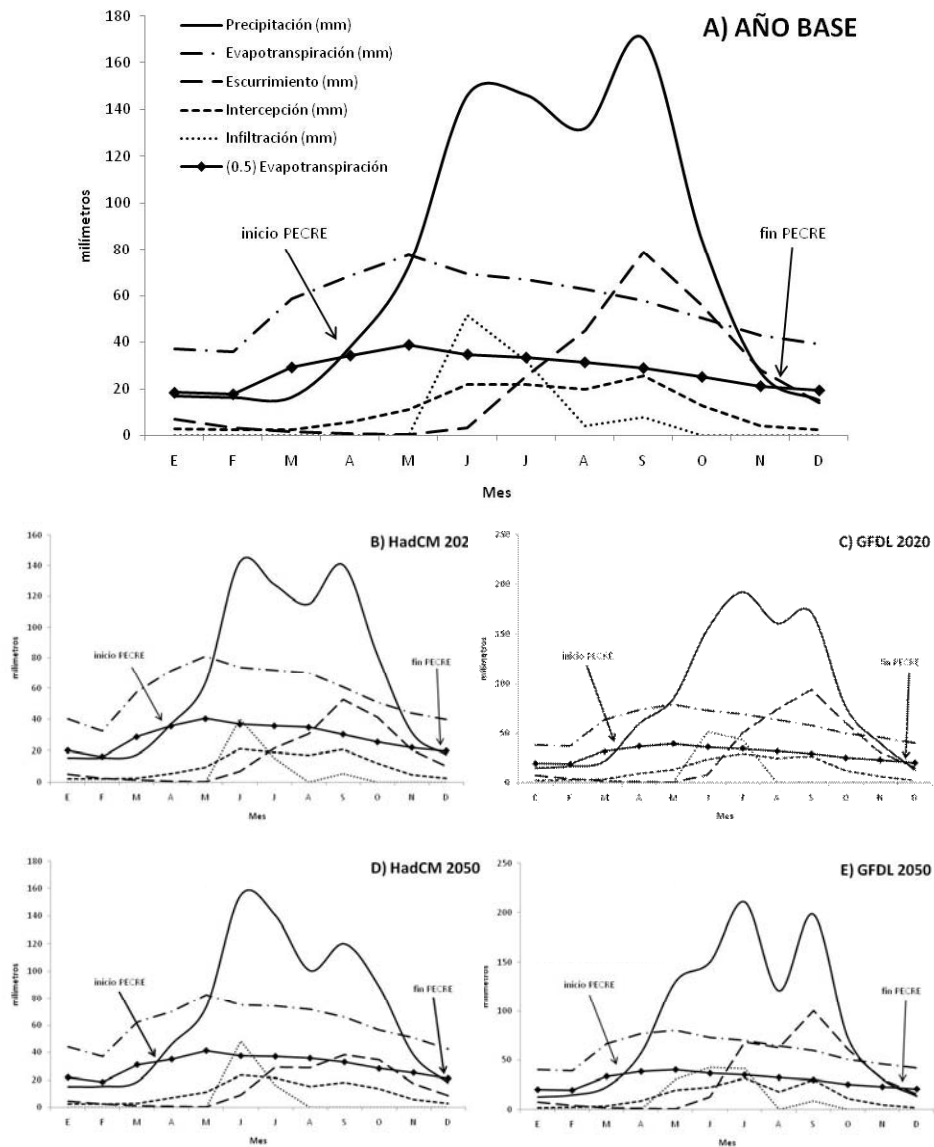


Figura 5. Balance hídrico mensual para a) Año Base, b) Modelo HadCM al año 2020, c) Modelo GFDL al año 2020, d) Modelo HadCM al año 2050 y e) Modelo GFDL al año 2050.

Además, como es de esperarse, al aumentar el PECRE, los escenarios de cambio climático señalan que podrían existir cambios en la fecha de inicio y fin del periodo. Para el año 2020 el modelo inglés sugiere que el PECRE podría retrasarse hasta cuatro días, al encontrarse que podría iniciar el periodo de crecimiento el 12 de abril. Los restantes tres escenarios de cambio climático sugieren que podría adelantarse el inicio del periodo de crecimiento en 7 días (modelo inglés al 2050) o en trece días (ambos escenarios del modelo norteamericano).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Caracterización climática detallada

El parque presenta un clima, de acuerdo con García (2004), del tipo $Cb(w_2)(i)gw$, tomando como referencia los datos promedios del parque, que corresponde a un clima templado, con verano fresco y largo, el más húmedo de los subhúmedos, con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10,2 mm, con poca oscilación anual de la temperatura, marcha anual de la temperatura del tipo Ganges y presencia de canícula. El programa de manejo (Melo y López, 2003, citado en CONANP, 2006) también señala valores similares de temperatura, observándose que para la presente investigación se obtuvieron valores más detallados para esta variable anual, variando de los 11 a los 16°C. Lo anterior se puede deber a que para dicha descripción se utilizó cartografía de escala más pequeña.

Los modelos de regresión lineal obtenidos para temperatura presentan variaciones en el rango de incremento de la temperatura conforme se aumenta la altura. Al ser una zona de barlovento, se observan variaciones altotérmicas

menores que en una zona de sotavento en el mismo estado, esto se asocia al mayor contenido de vapor de agua del aire en esta zona, que al ascender sobre la pendiente se condensa y se libera calor latente al pasar el agua de vapor a líquido, mismo que calienta el aire y reduce el rango de enfriamiento (Arhens, 2003). Al aplicar los modelos de regresión obtenidos sobre las curvas de nivel para la zona de estudio, se obtuvieron los mapas detallados de temperaturas mensuales y anual, observándose así el mejor detalle en la caracterización de esta variable.

Por otra parte, el trazo de isoyetas mensuales muestra que la distribución de la precipitación en la zona es primordialmente en verano, como resultado del efecto de los vientos alisios provenientes del Golfo de México. Así como con los huracanes que se forman en el Caribe y siguen su curso por el Golfo entre los meses de julio a octubre. Durante la época invernal las lluvias son influenciadas por los frentes fríos llamados "Nortes", mismos que están asociados al componente invernal del Monzón de Norteamérica, los cuales también aportan lluvia, aunque en menor cantidad que los sistemas de verano.

Modelos de cambio climático

Los modelos de cambio climático concuerdan, en cuanto a que para la zona de estudio se incrementará la temperatura inequívocamente. Dependiendo del modelo aplicado se obtuvieron incrementos que pueden ir desde 1°C y hasta los 2,4°C, en promedio para la zona. Este incremento de temperatura está ampliamente explicado por la acumulación de gases de efecto invernadero, que al ir aumentando su concentración en la atmósfera causan una mayor retrasmisión a la superficie de la radiación de

onda larga irradiada por la superficie de la tierra, lo que calienta más el aire y provoca un incremento en la temperatura. Para el escenario más tardío se prevé mayor acumulación de estos gases y la magnificación del fenómeno de calentamiento (IPCC, 2001).

La razón por la que los modelos de cambio climático difieren se asocia con las series de tiempo con las que se calibraron dichos modelos. El modelo norteamericano considera una cantidad significativa de estaciones de zonas con altas concentraciones de aerosoles, que son comunes en la costa este de dicho país, lo que reduce el calentamiento. Por su parte, el modelo inglés utiliza datos más globales donde estos elementos tienen menor peso (McGregor y Nieuwolt, 1998).

Las diferencias en precipitación estimadas en los escenarios de los modelos, en donde el modelo inglés reporta una disminución de aproximadamente 80 y 50 mm (-10 y -5%) para los años 2020 y 2050, respectivamente, se explica por un desplazamiento pequeño hacia el sur de la zona de corrientes descendentes y el menor avance de los centros de alta presión hacia el océano en la temporada caliente del año, lo que disminuirá la precipitación en las zonas aledañas al movimiento de estos sistemas. En cambio, el modelo norteamericano pronostica una mayor evaporación y con esto un mayor contenido de vapor de agua en la atmósfera, sin que esta zona se vea afectada considerablemente por el movimiento de los sistemas de vientos anteriores, lo que trae consigo un incremento en la precipitación (McGregor y Nieuwolt, 1998) de aproximadamente 200 mm para ambos años evaluados con el modelo (15% más).

Balance hídrico actual

Del total de la precipitación observada, en promedio para el periodo 1961-1990, 49% es evapotranspirada, 30% se escurre, 15% es interceptada y 6% se infiltra. Cabe señalar que estos valores son en promedio para el parque, que aunque se trabajó a más detalle geográfico, el balance permite establecer patrones generales de comportamiento para la zona. Sin lugar a dudas hacia las partes más altas del parque estos valores serán diferentes a las zonas planas y de menor altitud. La cobertura de vegetación predominante son los bosques de oyamel, pino-encino y oyamel-encino, quienes en conjunto ocupan alrededor de 2 300 ha que significa poco más del 85% del total del parque. Debido a lo anterior, se puede entender el porcentaje que representa la evapotranspiración con relación del total precipitado, ya que el tipo de vegetación es altamente demandante de agua para cubrir sus funciones.

El porcentaje de interceptación del agua de lluvia por la vegetación fue un parámetro evaluado de acuerdo a lo sugerido por la literatura, donde se consideró como un valor intermedio de lo observado por otros autores, por lo que se reconoce que para obtener resultados más reales debería de apoyarse con estudios locales para la variable. Finalmente, el valor de infiltración deberá ser considerado como teórico, ya que algunas características de los suelos en la región de estudio no fueron consideradas en el balance. Sin embargo, el valor obtenido no difiere considerablemente a lo señalado por CNA para los acuíferos estudiados.

Con lo anterior, se considera que el balance hídrico aquí presentado refleja el comportamiento general del agua en la región de estudio, por lo que al aplicar escenarios de cambio climático se podrán

considerar como escenarios futuros que son viables de experimentarse en el parque.

Balance hídrico bajo escenarios de cambio climático

El comportamiento de las variables climáticas, bajo escenarios de cambio climático, fluctúa dependiendo del modelo aplicado. En ambos modelos la temperatura se incrementará y por lo tanto la evapotranspiración también lo hará. Lo anterior se puede traducir en déficit hídrico en cuanto a humedad retenida e infiltrada se refiere.

En el caso del modelo inglés, que sugiere que la precipitación pluvial disminuirá, se observa una disminución en la cantidad de agua que escurre de 26% y 35% y de la cantidad de agua infiltrada de 26% y 32% para los escenarios al 2020 y 2050, respectivamente. Por su parte, en el modelo norteamericano, aunque sugiere aumentos en la evapotranspiración, se esperan incrementos tanto del escurrimiento (de 31% y 38%) como en la infiltración (de 6% y 23%), para los escenarios de 2020 y 2050, respectivamente, esto como consecuencia del incremento en las lluvias pronosticadas.

Este comportamiento es de esperarse debido a que el modelo norteamericano indica que el mes más húmedo será el mes de julio, en comparación con el promedio de los años 1961-1990, donde se ha observado que es el mes de septiembre. Esta situación corresponderá a que de presentarse más precipitación en los meses próximos al final de la estación seca (como lo sugiere el modelo inglés) el suelo tendrá mayor capacidad de retener humedad. En cambio, de presentarse en medio de la temporada húmeda (como lo sugiere el modelo norteamericano) el suelo ya se encon-

trará húmedo, por lo que un porcentaje mayor de la precipitación se escurrirá al rebasarse la capacidad de infiltración de los suelos.

Como se presenta en el programa de conservación y manejo (CONANP, 2006), el Parque Nacional El Chico representa una importante zona de recarga de agua al acuífero. De acuerdo con CNA (2007), el parque es una zona de recarga de los acuíferos Actopan-Santiago y Cuautitlán-Pachuca. Para el primero, se señala que la recarga natural es de 171,9 hm³/año, mientras que la extracción es del orden de 40,5 hm³/año, observando una condición de subexplotación. Por su parte, para el acuífero Cuautitlán-Pachuca, las cifras señalan una recarga de 204 hm³/año y una extracción de 483,3 hm³/año, lo que conlleva a una condición de sobreexplotación (CNA, 2007; DOF, 31 enero de 2003).

En caso de presentarse condiciones como las establecidas bajo el modelo norteamericano, el abastecimiento del acuífero no se vería tan afectado, ya que la infiltración y el escurrimiento posiblemente aumentarán. Sin embargo, como ya se presentó, existe la posibilidad de que se registren eventos extremos de lluvia, lo que pondría en riesgo a las poblaciones que se encuentren cerca de los cauces de los ríos o pendiente abajo de las presas o lagos, ya que habría la incidencia de inundaciones o desbordamientos. Además, el comportamiento de este modelo esconde un marcado aumento en la canícula, que aunque se prevé mayor cantidad de lluvia, la disminución sugerida en el mes de agosto podrá ser considerable e impactará en el comportamiento de las especies animales y vegetales.

Por su parte, bajo las condiciones del modelo inglés, que subraya una posible disminución en la cantidad de

agua infiltrada y escurrida, se presentarían condiciones de mayor estrés por déficit de agua en las comunidades vegetales del parque. Al disminuir la recarga de los acuíferos, como consecuencia de lo antes señalado, y si la demanda de agua sigue en aumento, éstos empezarían a sufrir un abatimiento, lo que implicaría desabasto de agua potable en las comunidades que dependen de pozos y manantiales. Por consiguiente, también se tendrían impactos negativos en la producción agrícola y pecuaria. Este modelo simula escenarios más extremos, lo que para fines de planeación de medidas de adaptación y mitigación debe de ser considerado sobre el modelo norteamericano para tener las mejores propuestas y estrategias a implementar y que reduzcan efectivamente los impactos negativos del cambio climático en el balance de humedad de los acuíferos a los que la superficie del parque abastece.

Una de las ventajas de elaborar balances hídricos mensuales es que se puede observar el comportamiento de las variables estudiadas bajo las condiciones actuales y con más detalle para los escenarios de cambio climático. Por ejemplo, los cuatro escenarios de cambio climático aplicados sugieren que la canícula se seguirá presentando en la región de estudio en el mes de agosto. Sin embargo, los modelos apuntan a que el mes más húmedo ya no se presentará después de la canícula, sino antes de ésta, en el mes de junio o julio. Este comportamiento no se ve reflejado en el balance hídrico anual.

La conducta de la canícula prevista por los modelos sugiere incongruencias, ya que de acuerdo con la circulación general de los vientos se torna difícil entender porqué se podría presentar en el mes de junio el máximo de precipitación. Sin embargo, de acuerdo al modelo norteamericano, para el año 2050, el

máximo de precipitación podría presentarse en el mes de julio, lo que pareciera ser más lógico con dicho comportamiento de los vientos. Este comportamiento deberá ser mejor estudiado en futuros estudios.

Servicio ambiental hidrológico

La realización de un balance hídrico mensual bajo condiciones actuales y con escenarios de cambio climático permitió conocer el comportamiento hidrológico actual y futuro posible en el área de estudio. El enfoque que se siguió fue el de evaluar la capacidad que tienen los ecosistemas en el parque de regular y mantener dicho balance hidrológico, para contar con mayores elementos que sustenten el análisis del servicio ambiental estudiado. De tal manera que se reconoce el valor que tienen las variables ambientales físicas (por ejemplo suelo y pendientes) como las biológicas (particularmente la vegetación) en la capacidad de los ecosistemas de proveer servicios ambientales.

El Parque Nacional El Chico es importante debido a la cantidad de servicios ambientales que provee a las comunidades que habitan a su alrededor, como es la capacidad de retener e infiltrar agua. Además, no solo se debe considerar la recarga de agua hacia los acuíferos, sino también otros servicios como la producción de oxígeno, captura de carbono y recreación, entre otros.

Sin embargo, es prioritario considerar el abastecimiento de agua hacia el subsuelo debido a la gran cantidad de actividades que dependen de ella. La descripción técnica y numérica del balance hídrico mensual permitió reconocer el papel que juegan otras variables ambientales de los ecosistemas (suelos y vegetación, por ejemplo), ya que, si bien

no fueron evaluadas directamente, si permiten reconocer el servicio ambiental que suministran a la sociedad y de acuerdo al presente estudio, a la regulación hídrica.

Es por lo anterior que se recomienda proteger y aumentar las zonas mejor conservadas del parque, como aquéllas con vegetación natural de bosque, para evitar que, como lo señalan los modelos, disminuya la cantidad de agua disponible para el uso humano. De tal manera que el servicio ambiental hidrológico, de captura y provisión de agua, no se vea alterado en sus diferentes componentes.

Finalmente consideramos que los futuros estudios en la región deberán encaminarse a la evaluación de otros servicios ambientales, ya que el presente documento trata sólo de uno de ellos, pero para comprender el valor del conjunto de servicios es menester la evaluación total de los servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas en el parque.

REFERENCIAS

- Arnell, N.W. 1999. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9(1):S31-S49.
- Ahrens, C.D. 2003. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. 7th ed. Brooks Cole, Pacific Grove, C.A. E.U.A. 608 p.
- CICS. Canadian Institute for Climate Studies. En internet: www.cics.uvic.ca, (2007/Jun/17).
- CNA. 2007. Límites de los acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos. Escala 1:250 000. Formato Digital. Comisión Nacional del Agua. México.
- COEDE. Consejo Estatal de Ecología del Estado de Hidalgo. Hoja descriptiva del Parque Nacional El Chico. En internet: www.coedehgo.gob.mx, (2007/Jun/23).
- CONANP. 2006. Programa de conservación y manejo del Parque Nacional El Chico. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México. 183 p.
- Costanza, R., R. D'Arge, R.S. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton y M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630): 253-260.
- Daily, G.C. 1997. Introduction: what are ecosystem services? *In*: Daily, G.C. (ed.) *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington D.C. E.U.A. p. 1-10.
- De Groot, R.S., M. Wilson y R. Boumans. 2002. A typology for description, classification and valuation of ecosystem function, goods and services. *Ecological Economics* 41(3): 393-408.
- DOF. 31 enero de 2003. Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización. Diario Oficial de la Federación, Secretaría de Gobernación. México.
- Dunne, T. y L. Leopold. 1978. *Water in environmental planning*. W. H. Freeman. E.U.A. 818 pp.

- FAO. 1978. Report on the agroecological zones Project. Vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report 48. Food and Agriculture Organization. Italia. 86 pp.
- Flores E., M.A. Mendoza y E. Buendía. 2005. Intercepción de agua de lluvia en bosques de clima templado. *In*: Benavides J.D., F. Becerra, T. Hernández, C. González, J.G. Flores (eds). Contribución al estudio de los servicios ambientales. Programa de Investigación en Servicios Ambientales. Libro Técnico Núm. 1. SAGARPA-INIFAP, México. pp: 75-92
- García, I., A. Martínez, A. Ramírez, A. Niño, A. Rivas y L. Domínguez. 2004. La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavi-lanes, Coatepec, Veracruz. *In*: Cotler, H. (comp.). El manejo integral de cuencas en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, pp: 99-116.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 91 pp.
- GFDL. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Modelo Norteamericano de Cambio Climático. En internet: www.gfdl.noaa.gov, (2006/Jun/02).
- Gómez, J.D., J. Etchevers, A. Monterroso, C. Gay, J. Campo y M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21(1): 35-56
- Gómez, J.D., A.I. Monterroso Rivas y J.A. Tinoco Rueda. 2007. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata*) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques* 13(2): 29-49.
- Hadley. Hadley Centre for Climate Change. The Met Office. U.K. En Internet: www.metoffice.com/research/hadleycentre/index.html, (2006/Jun/18).
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change, E.U.A. 1005 pp.
- IPCC. 2007. Cuarto informe de evaluación cambio climático 2007 (Resumen). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, E.U.A. 94 pp.
- Jiménez, F. 2005. El bosque como regulador del ciclo hidrológico. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Costa Rica. 150 pp.
- Kenny, G.J. y P.A. Harrison. 1992. Thermal and moisture of grain maize in Europe: model testing and sensitivity to climate change. *Climate research* 2: 113-129.
- Lobo, G. Ecosystem functions classification. Ecological Economics and Environmental Management Centre (ECOMAN). En Internet: <http://gasa.dcea.fct.unl.pt/ecoman/projects/delphi/index.asp>, (2005/Mar/01)
- MA. 2003. Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystem and human well being: A framework for assessment. Island Press, E.U.A. 266 pp.

- Maderey, L. y J. Carrillo. 2005. El recurso agua en México: un análisis geográfico. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 128 pp.
- Manson, R. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques* 10(1): 3-20.
- McGregor, G.R. y S. Nieuwolt. 1998. Tropical climatology: an introduction to the Climate of the Low Latitudes. 2th edition. John Wiley and Sons, Inglaterra. 352 pp.
- Meffe G., L.A. Nielsen, R. Knight y D. Schenborn. 2002. Ecosystem management. adaptive, community-Based conservation. Island Press. E.U.A. 313 pp.
- Monterroso, A.I. y J.D. Gómez. 2003. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Comisión Nacional de Zonas Áridas y Universidad Autónoma Chapingo, México. 170 pp.
- Myers, N. 1997. The world's forests and their ecosystem services. *In*: Daily, G.C. (ed.) Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Island Press. E.U.A., pp. 215-235.
- Pattanayak, S. 2004. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. *Agriculture Ecosystems & Environment* 104: 171-184.
- Rosegrant, M., X. Cai y S. Cline, 2002. Panorama global del agua hasta el año 2025, como impedir una crisis inminente. International Food Policy Research Institute, International Water Management Institute. Sri Lanka. 36 pp.
- SEMARNAT. 2003. Introducción a los servicios ambientales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Fundación Hombre y Naturaleza, México. 71 pp.
- SMN. 2000. Normales climatológicas de la República Mexicana. Servicio Meteorológico Nacional. México.
- Tinoco, J.A. 2005. Identificación y evaluación de patrones de distribución de tres especies forestales en el estado de Hidalgo: su comportamiento actual y frente al cambio y vulnerabilidad climática (tesis). Universidad Autónoma Chapingo, México. 160 pp.
- Westman, W.E. 1977. How much are nature's services worth? *Science* 197: 960-964
- WRS. 2004. National action program to combat desertification and mitigate the effects of drought. Water Resources Secretary, Environment Ministry. Brazil. 222 pp.

Manuscrito recibido el 11 de marzo de 2008

Aceptado el 19 de noviembre de 2008

Este documento se debe citar como: Monterroso-Rivas, A. I., J. D. Gómez-Díaz y J. A. Tinoco-Rueda. 2009. Servicios ambientales hidrológicos bajo escenarios de cambio climático en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. *Madera y Bosques* 15(2): 5-26.