

Escenarios regionales de cambio climático para la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda Guanajuato, México

Regional climate change scenarios in Natural Protected Area Sierra Gorda, Guanajuato, Mexico

Leticia Gómez-Mendoza*^o, Lourdes Bello Mendoza**^o, Dulce Abigail Cruz Torres*

RESUMEN

Las áreas naturales protegidas (ANP) representan una forma de adaptación y mitigación ante el cambio climático. Se presentan los resultados de la aplicación de un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (GETM) en el área natural protegida de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato (RBSGGto), caracterizada por un deterioro ambiental. Los resultados obtenidos para el periodo de 2010-2099 mediante el GETM *Long Ashton Research Station Weather Generator* (LARS-WG) muestran un aumento en la temperatura media de entre 1 °C y 2 °C, mientras que la precipitación aumentará hasta 3 mm. Se analizan las implicaciones hidrológicas de la cuenca con base en dichos escenarios regionalizados y se caracterizan las zonas de mayor afectación por cambio climático. Se prevé que el nivel de riesgo pueda ser minimizado para los diversos sectores de la reserva si se continúa con algunas de las actividades actuales de conservación. Sin embargo, el aporte actual y futuro de la precipitación no es suficiente para sostener las obras hidráulicas proyectadas para la zona, por lo que deben revisarse los programas de gestión del agua.

ABSTRACT

Natural protected areas represent a form of mitigation and adaptation to climate change. Results of a Stochastic Weather Generator (SWG) applied to the Natural Protected Area, Biosphere Reserve "Sierra Gorda Guanajuato" (RBSGGto) are shown in this paper. Results obtained for 2010-2099 period by LARS-WG for RBSGGto show an increase in average temperature between 1° C and 2° C, while precipitation will increase to 3 mm. Hydrological implications of basin are analyzed based on these regionalized scenarios and the most affected areas are characterized by climate change and their effects on biodiversity conservation. Results suggest that risk can diminish if actual conservation actions continue. However, present and future precipitation inputs will not be enough to support hydraulic projects in future for the region so, water supply programs must be revised.

Recibido: 28 de octubre de 2015
Aceptado: 18 de noviembre de 2016

Palabras clave:

GETM-LARS; reducción de escala; Guanajuato; cambio climático; Sierra Gorda-Guanajuato.

Keywords:

LARS-WG; downscaling; Guanajuato; climate change; Sierra Gorda-Guanajuato.

Cómo citar:

Gómez-Mendoza, L., Bello Mendoza, L., & Cruz Torres, D. A. (2017). Escenarios regionales de cambio climático para la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 27(1), 55-66. doi: 10.15174/au.2017.1077

INTRODUCCIÓN

Identificar la vulnerabilidad del cambio climático a escala local es imperativo. La identificación de los umbrales bajo los cuales opera el clima actual, así como de las condiciones anómalas en el clima, ayuda a identificar la vulnerabilidad actual, y así poder actuar con mecanismos propios de los habitantes e instituciones regionales. Disponer de herramientas que permitan construir escenarios del clima futuro y sus impactos son requisitos básicos para analizar la vulnerabilidad futura e identificar las estrategias de adaptación (Puma & Gold, 2011). La adaptación al cambio climático es un conjunto de acciones que garanticen el bienestar de la sociedad y de los sistemas naturales bajo escenarios climáticos futuros para enfrentar los aspectos negativos del cambio climático, disminuir su vulnerabilidad, minimizar daños y aprovechar posibles beneficios de las nuevas condiciones climáticas

* Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Circuito Interior Ciudad Universitaria, s/n, Torre de Humanidades 1, piso 3, cubículo 8. Ciudad de México, C.P. 04510. Tel.: 56 22 82 22, ext. 40855. Correo electrónico: gomez.leticia852@gmail.com

** Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

^o Autor de correspondencia.

(Baede, van der Linden & Verbruggen, 2010; Magaña, 2000). En el curso de los próximos años, la capacidad de resiliencia (Thompson, 2012) económica, social y natural de México ante el cambio climático dependerá de iniciativas de la sociedad, de las políticas públicas y de programas de desarrollo hacia la sustentabilidad (Comisión Intersecretarial de Cambio Climático [CICC], 2009).

El establecimiento de áreas naturales protegidas (ANP) es una de las herramientas más efectivas para poder mantener los ecosistemas dentro de sus funcionamiento naturales, además de permitir la adaptación de la biodiversidad y ayudar a enfrentar el cambio climático. Al designar un área definida geográficamente para su regulación y protección, se pueden ampliar corredores naturales en donde las especies puedan adaptarse y ajustar rangos de distribución frente a nuevas condiciones climáticas (Cruz, 2013; Loss, Terwilliger & Petersen, 2010; Parmesan, 2006; Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2010). Las ANP son, en sí, una estrategia de adaptación, ya que su objetivo es conservar y restaurar ecosistemas. Los diferentes ecosistemas llegan a almacenar grandes cantidades de carbono, conservan la biodiversidad biológica y mantienen los servicios ambientales para el propio bienestar de la humanidad (UICN, 2010). Estos ecosistemas suministran bienes y servicios ambientales de los que depende la humanidad, sin embargo, pueden verse comprometidos con el cambio climático en su papel de protección y amortiguamiento ante fenómenos hidrometeorológicos extremos, el resguardo de la integridad de los ecosistemas y la moderación del efecto del clima local.

En 2010, en México se dio a conocer la Estrategia de Cambio Climático para Áreas Naturales Protegidas (ECCAP), que tiene como objetivos aumentar la capacidad de los ecosistemas y las poblaciones que habitan en ellas frente al cambio climático y contribuir a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. En 2015 se publica la Estrategia de Cambio Climático desde las ANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2015), con el propósito de contribuir a la construcción de un México más resiliente, a través de acciones que protejan y mejoren el manejo de los paisajes bien conservados. Por su parte, la Estrategia Nacional de Cambio Climático visión 10-20-40 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2013) indica que se deben conservar y usar los ecosistemas de forma sustentable, y reconoce a las ANP como soluciones para hacer frente al cambio climático. De modo paralelo, la Ley General de Cambio Climático (DOF, 2012), en los artículos 29 y 30, establece

a las ANP como acciones de adaptación que impulsa la construcción de capacidades para la adaptación y aumentar la resiliencia. No obstante estos esfuerzos, la identificación de las amenazas por cambio climático apenas comienza en el sector de conservación. Por otro lado, las estrategias de cambio climático en áreas protegidas recién comienzan a implementarse, por lo que este estudio analiza las oportunidades de incorporar el conocimiento de los cambios del clima local y regional en la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda Guanajuato (RBSGGto) para su integración en la toma de decisiones ante la adaptación y la mitigación.

Un *escenario* se define como una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climáticas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico (Solomon *et al.*, 2007). Los escenarios de cambio climático son un insumo para las simulaciones de los impactos y requieren de información adicional acerca del clima observado en un momento determinado. Para reflejar mejor el rango de incertidumbre en el clima futuro, es conveniente aplicar un conjunto de escenarios de cambio climático (Nakicenovic *et al.*, 2000).

Los modelos de circulación general de la atmósfera (GCM, por sus siglas en inglés) se utilizan para estudiar la variabilidad y cambio climático, pero requieren acotar su nivel de análisis a nivel regional. La construcción e implementación de escenarios de cambio climático son una de las primeras acciones para realizar evaluaciones de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, especialmente en el contexto de los impactos potenciales en los sectores clave de un país o una región (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2005), y de ellos depende la dirección de los impactos estimados. La necesidad de contar con información detallada para diseñar políticas de adaptación ha llevado a generar escenarios de cambio climático a escala regional (Puma & Gold, 2011). Los escenarios regionales constituyen puentes entre los especialistas en los GCM y los responsables de construir estrategias de adaptación (Sánchez, Díaz, Cavazos, Granados & Gómez, 2011), ya que relacionan los posibles cambios en el clima con las capacidades humanas actuales y futuras para disminuir sus impactos.

Las técnicas de reducción de escala son generalmente utilizadas para combinar información climática de escala menor con otros datos de más alta resolución, a fin de producir pronósticos de variables climáticas a

resoluciones más detalladas. Una gran variedad de métodos estadísticos de reducción que se reportan en la literatura se pueden clasificar en tres amplias categorías: (1) modelos de regresión, (2) clasificación del clima y (3) generadores climáticos (Estrada, Guerrero & Gay, 2010; Puma & Gold, 2011). Las técnicas estadísticas de reducción de escala se basan en el establecimiento de relaciones empíricas entre variables de baja y alta resolución. Por lo tanto, este método está basado en la influencia del estado climático a gran escala y en los aspectos fisiográficas regionales, como la topografía y el uso del suelo, dentro del clima de una región (Zermeño, 2008).

El escalamiento temporal puede ser de tipo estadístico y, para ello se usan los Generadores Estocásticos de Tiempo Meteorológico (GETM). Además de reducir la escala espacial de las salidas de los GCM, para obtener un mayor análisis, es necesario que los escenarios de cambio climático a escala regional posean información sobre actividad de tiempo meteorológico extremo. Para esto, se requiere pasar de escenarios mensuales a información diaria, y para ello se aplican los GETM, los cuales se basan en el establecimiento de relaciones empíricas entre variables de baja y alta resolución, de distintas variables, como precipitación, radiación, temperatura mínima, máxima de los campos observados diarios (Magaña, 2010). Así, la información diaria generada no corresponde a un pronóstico, sino a una condición que satisface condiciones estadísticas del modelo, derivadas de las relaciones empíricas entre las variables analizadas de alta resolución (Méndez, 2003; Zermeño, 2008).

Un GETM produce secuencias diarias realistas de variables climáticas como precipitación, temperatura máxima, mínima, humedad, etcétera, con las mismas características estadísticas (probabilísticas) que los datos observados para la estación o punto de malla a escalar en la proyección. La componente estocástica en un generador de tiempo está controlada por la selección de un número al azar, a través del proceso aleatorio. Cambiando este número, se obtienen secuencias de tiempo completamente diferentes, lo cual significa que es posible generar muchas secuencias de tiempo diario de un escenario en particular. Las secuencias estadísticas de cada escenario serán muy parecidas, pero no idénticas (Semenov & Brooks, 1999).

De manera similar, se pueden analizar cambios en las condiciones extremas de otros parámetros meteorológicos, como la media y la desviación estándar. El análisis de eventos extremos debe incluir variables

climáticas promedios o valores promedios y extremos de las variables climáticas. La predicción depende, en gran medida, de la variable; por ejemplo, la temperatura diaria o mensual mínima, máxima y promedio (Puma & Gold, 2011). A partir de los escenarios mensuales regionalizados se generan series de cien años de datos diarios con un GETM. Las estadísticas de la distribución probabilística de condiciones diarias de temperatura y precipitación se desarrollan para los periodos de 2025, 2050 y 2075, que corresponde a las décadas centradas alrededor de estos periodos.

Un GETM permite evaluar, probabilísticamente, posibles cambios en eventos extremos de precipitación y temperatura bajo escenarios mensuales, ya que contribuye a generar series aleatorias de datos diarios de cien años, que al ser una muestra más grande da robustez estadística a la proyección. Los GETM son usados siempre que se requieran modelos de impactos en una pequeña escala (Semenov & Brooks, 1999). Un ejemplo de un GETM es el llamado *Long Ashton Research Station Weather Generator* (LARS-WG) (Semenov, Brooks, Barrow & Richardson, 1998) que genera datos sintéticos diarios para una estación climatológica o punto en el espacio a partir de condiciones observadas de precipitación, temperatura máxima, mínima y radiación, en relación con condiciones mensuales. Aplicaciones del modelo LARS-WG a escala local en México han resultado en alta confiabilidad en estudios aplicados al rendimiento del frijol en Durango (Esquivel-Arriaga *et al.*, 2014), así como en la comparación con otro modelo estadístico-dinámico (Camargo-Bravo & Garcia-Cueto, 2011).

La región de la RBSGGto recibe la influencia de diversos sistemas meteorológicos: en verano por ondas tropicales, vaguadas y líneas de convergencia, y en invierno, por frentes fríos, ocasionando bajas temperaturas (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2012). Una de las principales afectaciones es la sequía, como la ocurrida entre los años 2005 y 2006 (Cruz, 2013). En el 2009, la ocurrencia del fenómeno El Niño redujo las precipitaciones en Guanajuato y ocasionó un periodo prolongado de sequía que afectó a todo el estado (Sistema Estatal de Información del Agua [SEIA], 2008).

Asimismo, en la zona que abarca el área de amortiguamiento de la reserva se encuentra la presa El Realito, que terminó de construirse en 2013, la cual se beneficia de la recarga de los acuíferos de la RBSGGto; proyecto que se basa en la creación de infraestructura hidráulica para garantizar el suministro de agua potable

a San Luis Potosí y a los municipios de la región noroeste del estado de Guanajuato. Hidrológicamente, la RBSGGto se localiza en una zona que siempre se ha visto limitado el recurso hídrico, tanto del agua subterránea como superficial, ocasionando que el crecimiento poblacional y económico también sea limitado (Bello, 2014; Cruz, 2013; Uzeta, 2005). Además, los servicios ambientales son fuertemente disminuidos en la zona donde se construye la cortina de la presa, por ejemplo, se ha reportado un impacto directo al bosque de galería que se encuentra establecido a las márgenes del río Santa María (Comisión Nacional del Agua [Conagua], s/a).

Ante este diagnóstico, surgen las siguientes preguntas: ¿qué cambios se esperan en la temperatura, precipitación y los eventos extremos a escala regional en la RBSGGto ante el cambio climático? y ¿qué implicaciones hidrológicas pueden tener estos cambios en el funcionamiento de la infraestructura actual y futura?

De igual forma, el objetivo principal de la investigación es identificar la amenaza climática actual y futura de la RBSGGto, mediante un Generador Estocástico del Tiempo Meteorológico (GETM-LARS) para el periodo de 2010-2099, así como calcular el balance hídrico con base en las tendencias y los escenarios del clima. La generación de escenarios de línea base y tendenciales del clima resultarán de utilidad para la toma de decisiones estatales, locales y de actividades

de conservación, al igual que el uso del clima como un recurso actual y futuro por parte de las comunidades de habitan la reserva.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

En 2007, por decreto, la zona conocida como Sierra Gorda de Guanajuato aprobó las características y requisitos para ser protegida, por lo que se declaró área natural protegida (ANP) (DOF, 2007), con el carácter de reserva de la biósfera (Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato [IEG], 2005). Se ubica en el estado del mismo nombre, entre las coordenadas geográficas 21°10'42.13" y 21°41'15" latitud norte, y 99°40'17.16" y 100°28'35.92" longitud oeste; se localiza en los municipios de Atarjea, San Luis de la Paz, Santa Catarina, Victoria y Xichú; cuenta con una superficie total de 236 882 ha, de las cuales 158 578 ha forman parte de la zona de amortiguamiento y 78 304 ha conforman la zona núcleo (figura 1).

Para asegurar la cobertura de la información climática, fue necesario generar un área de influencia (*buffer*) de 20 km alrededor del límite de la RBSGGto (figura 1), que incluyeron 22 estaciones climatológicas (figura 1 y tabla 1), de las cuales cinco se encuentran dentro de la poligonal de la reserva y 17 se seleccionaron con base en el área de influencia.

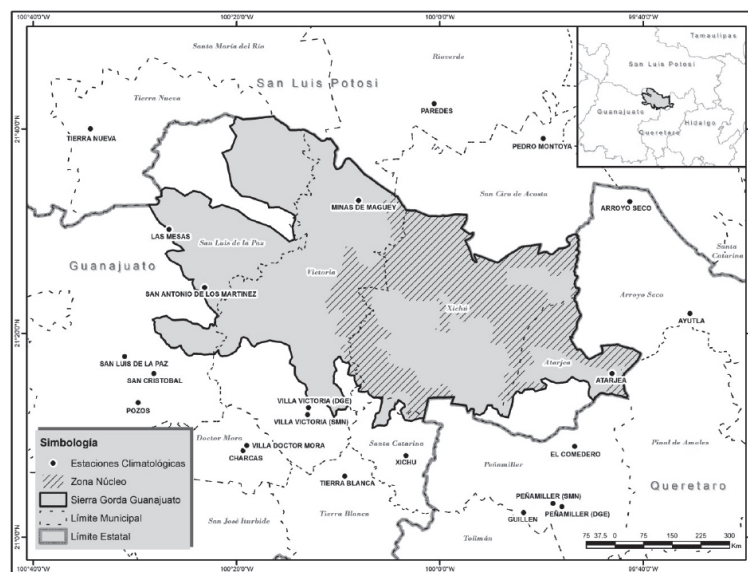


Figura 1. Ubicación general de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos de Conanp (2012) e INEGI (2012).

Tabla 1.
 Situación general de las estaciones ubicadas en la RBSGGto.

Clave	Nombre	Municipio	Lat	Long	Altitud	Inicio	Fin	Prueba de Homogeneidad
11015	Charcas	Doctor Mora	21.14	-100.32	2114	01/04/1949	31/07/2008	Homogénea
11037	Las Mesas	San Luis de la Paz	21.5	-100.44	2290	01/01/1961	31/12/1995	Homogénea
11046	Minas de Maguey	Victoria	21.55	-100.13	1000	01/01/1961	30/06/1988	Homogénea
11053	Pozos	San Luis de la Paz	21.21	-100.49	2203	01/04/1949	30/06/2009	Homogénea
11062	San Antonio de los Martinez	San Luis de la Paz	21.4	-100.38	2280	01/01/1961	30/04/1992	Homogénea
11063	San Cristobal	San Luis de la Paz	21.26	-100.46	1935	01/09/1965	31/07/2008	Homogénea
11068	San Luis de la Paz	San Luis de la Paz	21.29	-100.51	1933	01/08/1924	31/12/2007	Homogénea
11080	Villa Doctor Mora	Doctor Mora	21.15	-100.31	2125	01/07/1953	30/11/1990	Homogénea
11081	Villa Victoria (Smn)	Victoria	21.2	-100.21	1800	01/01/1949	31/12/1985	Homogénea
11082	Villa Victoria (Dge)	Victoria	21.21	-100.21	1800	01/01/1986	31/07/2008	Homogénea
11083	Xichú	Xichú	21.13	-100.05	1310	01/01/1969	30/06/2009	Homogénea
11111	Atarjea	Atarjea	21.26	-99.71	1200	01/06/1976	31/07/2008	Homogénea
11119	Tierra Blanca	Tierra Blanca	21.09	-100.15	1760	01/07/1976	30/11/2008	Homogénea
22002	Ayutla	Arroyo Seco	21.36	-99.59	950	01/12/1965	31/05/2007	Homogénea
22012	Peñamiller (Smn)	Peñamiller	21.05	-99.81	1325	01/01/1944	31/12/1986	Homogénea
22036	Arroyo Seco	Arroyo Seco	21.54	-99.68	990	01/04/1944	31/12/2006	Homogénea
22051	El Comedero	Peñamiller	21.14	-99.77	1880	01/01/1982	31/12/2006	Homogénea
22057	Peñamiller (Dge)	Peñamiller	21.05	-99.8	1325	01/12/1982	30/09/2007	Homogénea
22062	Guillen	Peñamiller	21.04	-99.86	1370	01/02/1982	30/06/2007	Homogénea
24050	Paredes	Rioverde	21.7	-100	1300	01/04/1960	31/05/2007	Homogénea
24054	Pedro Montoya	San Ciró de Acosta	21.65	-99.83	830	01/12/1965	31/05/2007	Homogénea
24093	Tierra Nueva	Tierra Nueva	21.66	-100.57	1780	01/01/1961	31/07/2007	Homogénea

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Clima Computarizado (CLICOM).

La prueba de recorrido consiste en evaluar los cambios de cada uno de los elementos de la serie en relación con la mediana, y compara el número de cambios con los umbrales correspondientes a una distribución de frecuencias de una serie aleatoria (para este caso Criterio de Doorenbos). Si el número de rachas está dentro del límite establecido, la serie se considera homogénea; si existen muchas rachas, indica una oscilación en la mediana durante el periodo de la muestra y, por tanto, se considera heterogénea (Fernández, 1996).

Datos del clima y aplicación de LARS-WG

Los datos de las variables climáticas se obtuvieron de Sistema Clima Computarizado (CLICOM) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la base de datos del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III v.2.0) del Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA). La base de CLICOM se utilizó para medir la calidad de los datos a partir de la prueba de funcionamiento y la prueba de recorrido (Fernández, 1996)

para las 22 estaciones. El periodo de registro de las estaciones abarca un promedio de 40 años. Los datos generales de cada una de las estaciones que se encuentran en la zona de trabajo abarcan tres estados: Guanajuato (13), Querétaro (6) y San Luis Potosí (3). La prueba de homogeneidad, fue aplicada a las 22 estaciones; el resultado arrojó que 20 estaciones son homogéneas y 2 heterogéneas (tabla 1). San Luis de la Paz (11068) y Arroyo Seco (22036) tienen una mayor longitud observable y fueron utilizadas para aplicar el GETM LARS-WG. Una vez seleccionadas las estaciones de la zona y realizada la prueba de recorrido y funcionamiento se procede a aplicar LARS-WG, para lo cual se generan los archivos de sitio (Juan Matías Méndez Pérez, *comunicación personal*):

1. *Calibración* para generar el clima sintético. Se observan los datos meteorológicos y se analizan para determinar sus características estadísticas. Los datos de calibración deben ser simulaciones correspondientes a un periodo observado para cada una de las estaciones.

- a) Un archivo de parámetros, que contiene los parámetros requeridos por LARS-WG para generar las series de tiempo.
- b) Un archivo de estadísticas que contiene la distribución de frecuencias de temporada para la longitud de la serie en época húmeda y época de estiaje, así como para temporada fría o cálida.

2. *Validación* evalúa la capacidad de LARS-WG para simular el clima en el lugar. Se generará el número de experimentos con base en la “semilla” aleatoria de la componente estocástica del modelo (simulaciones que se repiten de la misma forma, una y otra vez) (*Rand seed*, se le asigna por defecto), donde las características estadísticas de la observación y los datos meteorológicos sintéticos se analizan para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas.

3. *Generación de las series de tiempo*. Se selecciona el punto geográfico más cercano de cada estación y se usaron los puntos malla del modelo del escenario con base en Zermeño (2008); se selecciona el escenario según las coordenadas de la estación más cercana.

Para este estudio se usaron dos escenarios: A2 (B) muy altas emisiones y A1B (C) de emisiones medias para los periodos centrados de 25 (2010-2039), 50 (2040-2069) y 75 (2070-2099), con una resolución de 0.5 km, clasificados en eventos extremos, datos atípicos, rango de normalidad y la media. Los datos sintéticos realizados pertenecen a un escenario, que corresponde a datos de temperatura máxima, mínima y precipitación, se contrastan con la climatología de la estación para explicar las condiciones históricas y futuras en la región.

Los datos arrojados por LARS-WG sugieren cambios en las condiciones extremas de los parámetros meteorológicos, con base en gráficas como de caja (boxplot) y la Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Las estadísticas de la distribución probabilística de condiciones diarias de temperatura y precipitación se desarrollan para los periodos: proyección cercana (2010 al 2039), media (2040 al 2069) y a largo plazo (2070 al 2099).

Con las series de tiempo obtenidas de los datos observados y de los escenarios regionalizados se generaron diagramas de boxplot y PDF, con las cuales se

identifica si el clima en la región presenta cambios en las series de tiempo que se desarrollan para los periodos: proyección cercana, media y a largo plazo.

- c) Aplicación de un modelo de balance hídrico.

El modelo *WebWIMP* (*Web-based, Water Budget, Interactive, Modeling Program*, Matsuura, Willmott & Legate, 2009) está diseñado para calcular el balance hídrico de cualquier ubicación con datos de temperatura promedio mensual y de precipitación, que se han interpolado a 0.5° de latitud por 0.5° de longitud; asimismo, el balance hídrico está calculado por la modificación de Thornthwaite, mismo que considera variables como evapotranspiración y balance de vapor de agua. Cuando las necesidades de agua de la vegetación (evapotranspiración potencial) y agua, utilizadas efectivamente (evapotranspiración real), se comparan, se puede calcular la escasez de agua: déficit de humedad (Matsuura *et al.*, 2009).

RESULTADOS

Escenarios de cambio climático para la RBSGGto

Con la aplicación del GETM LARS-WG para escenarios de cambio climático regionalizados se obtuvo para la RBSGGto el promedio de la temperatura mínima, la cual tiende a aumentar 1 °C, mientras que los valores atípicos alcanzan un incremento de hasta 6 °C respecto a la temperatura observada. Los resultados apuntan a un incremento en la frecuencia de los eventos máximos extremos, pero sin cambios en la intensidad. Estos escenarios sugieren un aumento en los valores de las temperaturas mínimas de la región. Por otro lado, la temperatura máxima tiende a aumentar entre 1 °C y 2 °C para la región de la reserva. Para algunas estaciones, los valores mínimos atípicos de las temperaturas máximas disminuyen su intensidad aproximadamente 1 °C (11 068, 11 080, 11 083, 11 111, 11 119, 22 036, 22 057, 22 062 y 24 093), mientras que en otras aumenta con valores de 1 °C (11 015, 11 046, 11 063, 11 082, 22 002, 22 012, 22 051 y 24050). La precipitación presenta resultados diferentes en cada estación, solo en algunas se incrementa la intensidad en 2 mm (11 046, 11 068, 11080, 11082, 11 119, 11111, 22 036, 22 051), mientras que diez estaciones no presentan cambios en los valores promedio (11 015, 11 053, 11080, 11 083, 11 111, 11 119, 22 002, 22 051, 22 057, 24 093). Los valores moderadamente atípicos y atípicos de la precipitación presentan incremento de 5 mm en varias estaciones (11 046, 11 068, 11 080, 11 082, 11 111, 11 119, 22 002, 22 036,

22 051, 24 050), a excepción de cuatro estaciones (11 015, 11 063, 11 083, 22 062) que muestran una disminución de 1 mm en valores máximos moderadamente atípicos. Los valores atípicos no presentan cambios solo en las estaciones (11 015, 11 082, 11 083). En casi todas las estaciones (72%) se presenta una disminución en la intensidad de los valores extremos, entre 10 mm y 25 mm menos que la precipitación observada; con excepción de una estación (11 083), que presentó un aumento de 3 mm y en tres estaciones disminuye (11 053, 11 080, 24 050).

Los resultados de la simulación con el GETM-LARS demuestran que en la estación Atarjea, bajo el escenario B (A2 muy altas emisiones), la temperatura máxima representada incrementa 1 °C al escenario cercano, 2010-2039 (figura 2a) con respecto a la temperatura observada, que es de 28 °C. El incremento de la mediana va aumentando conforme se aleja de la serie observada, llegando a una temperatura máxima de 30.5 °C al escenario lejano (2070-2099). En cuanto a las condiciones extremas, también se identifica un cambio, tanto en los valores máximos y mínimos atípicos como en los extremos, presentándose mayor intensidad y frecuencia en los máximos atípicos, aumentando de 44° C (observada) a 51.2 °C del escenario lejano (2070-2099). Los valores mínimos extremos ya no se presentan en las series de tiempo proyectadas, lo que indica un desplazamiento en el tiempo hacia temperaturas más cálidas.

Asimismo, la temperatura máxima para el escenario cercano en su PDF (figura 2b) presenta un desplazamiento de la curva, incrementando la temperatura y disminuyendo en frecuencia. El valor de la media cambia, incrementando 1.3 °C. Los valores mínimos atípicos aumentan 2 °C y disminuirán su frecuencia. En los valores máximos atípicos se presentan nuevas frecuencias que van de los 47.5 °C a los 49.5 °C; las frecuencias observadas van de los 40.5 °C a los 42.5 °C. La tendencia de la curva es desplazarse a temperaturas más cálidas; esto es, presentarse menos eventos de temperaturas mínimas extremas y se observan nuevos eventos de temperaturas máximas con una mayor intensidad y menor frecuencia.

Los resultados de boxplot para la temperatura mínima (figura 3a) se observa que el valor de la media aumenta 1 °C en el escenario cercano (2010-2039) con respecto a la observada de 14 °C. La temperatura se desplaza a temperaturas más cálidas conforme se recorren las series de tiempo. Los valores mínimos atípicos presentan un decremento de la temperatura de 0.5 °C para el escenario cercano (2010-2039) con respecto a los observados de -3 °C.

La temperatura mínima para la gráfica de PDF muestra un escenario medio (figura 3b) que presenta un desplazamiento de la curva, incrementando la temperatura y disminuyendo en frecuencia. El valor de la media cambia, incrementando 1.5 °C. Los valores mínimos extremos aumentan 2 °C y disminuyen su frecuencia. En los valores máximos extremos se presentan nuevas frecuencias, que van de los 27.5 °C a los 29.5 °C, las frecuencias observadas van de los 20.5 °C a los 22.5 °C. La tendencia de la curva es desplazarse a temperaturas más cálidas, esto significa que, se esperan menos eventos de temperaturas mínimas extremas y más eventos de temperaturas máximas.

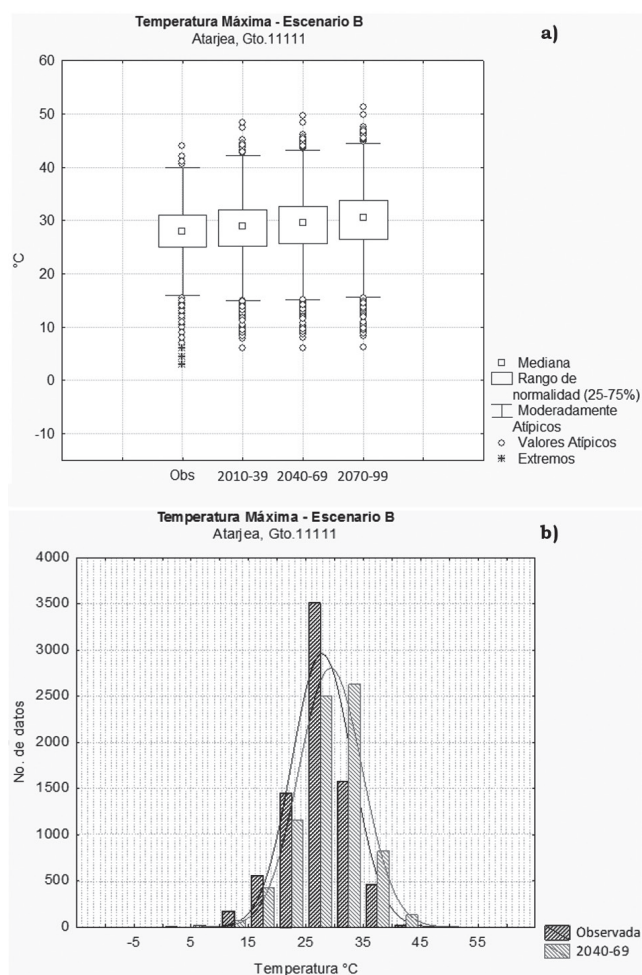


Figura 2. Gráficas de Boxplot y PDF del escenario B para la estación Atarjea de los datos observados, contrastados con los realizados con LARS-WG a) Boxplot de temperatura máxima observada con los escenarios proyectados; b) PDF de la temperatura máxima y proyección a mediano plazo.

Fuente: Elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2011).

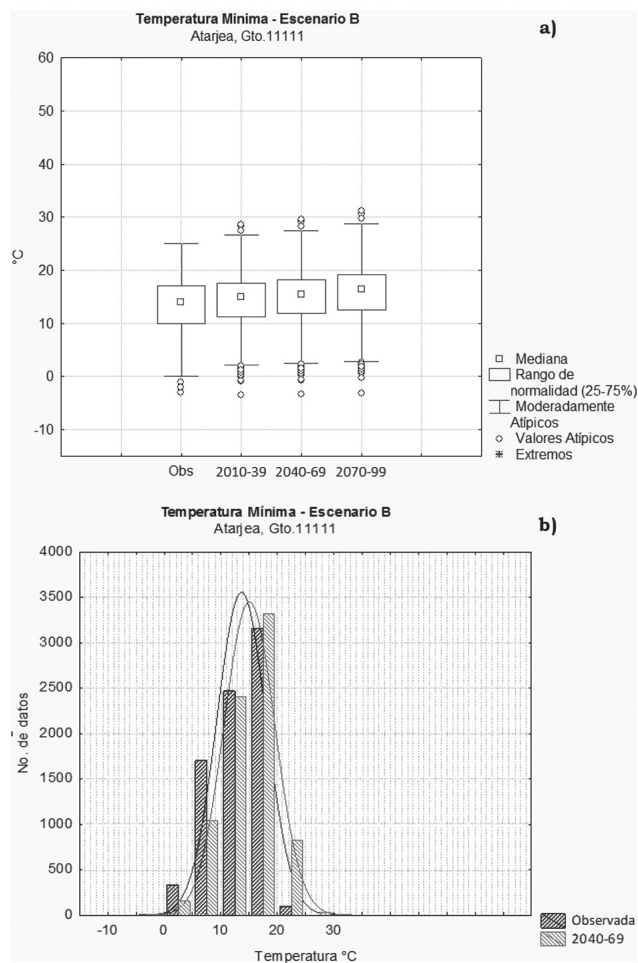


Figura 3. Gráficas de Boxplot y PDF del escenario B para la estación Atarjea de los datos observados, contrastados con los realizados con LARS-WG a) Boxplot de la temperatura mínima observada con los escenarios proyectados; b) PDF de la temperatura mínima y su proyección a mediano plazo.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2011).

Para la precipitación para las gráficas de boxplot (figura 4a), el valor de la mediana se conserva. El cambio más representativo se observa en los valores atípicos y en los extremos. En el caso de los valores atípicos, hay un aumento en la intensidad que va de los 48 mm (observada) a los 50 mm (para el periodo lejano del 2070 al 2099). En cuanto a los extremos, se observa una disminución en la frecuencia y en la intensidad de 107 mm (observada) a 92 mm (para el periodo lejano del 2070 al 2099).

Asimismo, la precipitación y su gráfica en PDF para el escenario medio (figura 4b) muestra que la curva del

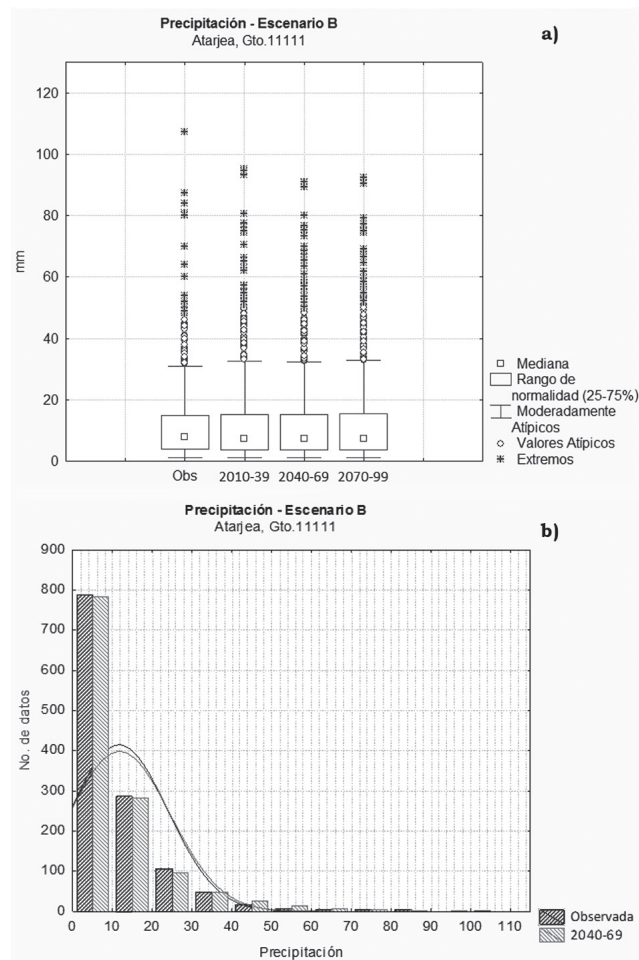


Figura 4. Gráficas de Boxplot y PDF del escenario B para la estación Atarjea de los datos observados, contrastados con los realizados con LARS-WG a) Boxplot de precipitación con los distintos escenarios proyectados; b) PDF de la precipitación y su proyección a mediano plazo.

Fuente: Elaboración propia con datos de SMN (2011).

escenario se desplaza hacia menores frecuencias de los valores, en donde se concentra la media de los datos. La intensidad permanece como la observada. La frecuencia permanece al igual que la observada en los datos que se encuentran debajo de la curva. Las frecuencias extremas del escenario incrementan con respecto a las observadas y su intensidad aumenta 4 mm.

Balance hídrico para la RBSGGto

El análisis del balance hídrico muestra que para los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo existe una carga estimada negativa en la humedad

del suelo, mientras que para los meses de febrero, marzo, abril y mayo se encuentra el déficit en la humedad del suelo, y los meses favorecedores para la zona son junio, julio, agosto, septiembre y octubre de entre 80 mm y 140 mm sin presentar un superávit (figura 5).

Los datos a nivel mensual del modelo *WebWIMP* (tabla 2) registran como valor máximo 22.4 °C de temperatura mensual máxima para mayo, que corresponde con el déficit mostrado en la figura 3 y de temperatura mínima 15.1 °C para el mes de enero. El valor máximo de precipitación es de 92.5 mm en junio y el valor mínimo fue de 6.8 mm para diciembre.

DISCUSIÓN

Los escenarios regionales ofrecen una medida de confianza o posible incertidumbre en las proyecciones (Méndez, 2003). La aplicación de escenarios regionales de cambio climático permite aproximar las tendencias globales con el comportamiento local del clima. Para este estudio, los resultados señalan que la temperatura tiende a incrementarse entre 1 °C y 2 °C proporcionalmente a los años proyectados; es decir, conforme transcurre el tiempo se incrementará la temperatura de la RBSGGto. En lo que respecta a la precipitación, los valores extremos muestran una tendencia a disminuir, serán menos frecuentes e intensos.

Los resultados obtenidos en este estudio por medio del GETM-LARS muestran coincidencias con los valores obtenidos en el Programa Estatal de Cambio Climático del Estado de Guanajuato (PECCEG), con base en escenarios no regionalizados en donde el escenario A2 del IPCC para la región presenta cambios significativos para el noreste del estado, con un aumento en la temperatura entre 0.5 °C y 2.5 °C, así como una disminución entre 0% a 5% de la precipitación. Mientras que los del PECCEG, para su escenario cercano (2010-2039) la temperatura tendrá un aumento de entre 0.5 °C y 1 °C, para el escenario medio (2040-2069) la temperatura aumentará entre 1.5 °C y 2 °C, para el escenario lejano (2070-2099) aumentará entre 2 °C y 2.5°C, alta coincidencia con los obtenidos con el GETM-LARS que también aumenta 1 °C en valores promedios, mientras que la precipitación media anual para los tres casos disminuirá entre 0% y 5%, los obtenidos con el GETM-LARS tienden a la disminución entre 0% y 30%.

En este trabajo se pudo acotar el cambio a escala regional con una mayor precisión (0.5 km por 0.5 km

de malla) por medio de la aplicación del LARS-WG. En general, existe un incremento de 1 °C a 2° C con respecto a la temperatura observada. Habrá consecuencias en tres presiones que se presentan en la reserva, las cuales son: sequía, erosión y pérdida de la biodiversidad. Debido al incremento de la temperatura, se hace más recurrente e intensa la sequía, lo cual puede reducir la productividad de los suelos, especialmente en las zonas secas de la RBSGGto.

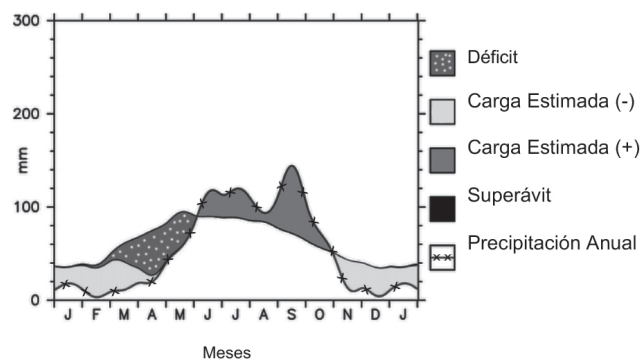


Figura 5. Gráfica obtenida por el programa *WebWIMP* donde se observa el ciclo anual: DEF: Déficit de humedad del suelo, DST: Carga estimada en la humedad del suelo, (-) Es el agua tomada del suelo para satisfacer las necesidades de evapotranspiración, (+) Es el agua que regresa al suelo por precipitación, SURP: Superávit estimado.

Fuente: *WebWIMP* (Matsuura *et. al.*, 2009).

Tabla 2.

Datos mensuales obtenidos mediante el modelo de balance hídrico.

Mes	Temp (C°)	Prec (mm)
Enero	15.1	13.4
Febrero	16.8	7.8
Marzo	19.1	12.9
Abril	21.0	25.5
Mayo	22.4	55.7
Junio	22.1	92.5
Julio	21.2	72.9
Agosto	21.1	71.4
Septiembre	20.5	79.0
Octubre	18.7	34.4
Noviembre	16.9	12.2
Diciembre	15.6	6.8
Anual	19.2	484.5

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM.

Martínez, Ortega-Sánchez & Ramos (2013), en un estudio sobre índices climáticos regionales para el estado de Guanajuato, detectaron que habrá aumento de sequía meteorológica asociado con el aumento de temperaturas para los siguientes años. Asimismo, en el diagnóstico realizado para la RBSGGto (Cruz, 2013; SEIA, 2008) se identificó la presencia del fenómeno El Niño en 1998, lo que provocó altas temperaturas, sequía e incendios forestales, incidiendo en la propagación de plagas forestales en la región. Aunado a esto, la presencia del descortezador (*Dendroctonus mexicanus*) ha afectado severamente los bosques de pino piñonero (*Pinus cembroides*) en los municipios de Atarjea y Xichú (Cruz, 2013). Otro de los problemas presentes en la región causados por el cambio en el clima es la presencia de muérdago (plantas parásitas); en los bosques de encino (*Quercus*) de San Luis de la Paz se identifican afectaciones por *Phoradendron lanceolatum* y *P. longifolium* (Cruz, 2013).

En el estado de Guanajuato, en general, y en la RBSGGto, en lo particular, el recurso hídrico es limitado, dificultando el abastecimiento a la población. Esta condición de aridez del clima se ha presentado siempre, por lo que aparentemente la disminución de la precipitación no representa una problemática apremiante para las autoridades, ya que, a decir de ellos, ante tales amenazas no se puede hacer nada más que adaptarse (Ing. A. Ildefonso, *comunicación personal*). Sin embargo, las tendencias del clima, de acuerdo con los escenarios obtenidos en este estudio, apuntan a una necesidad urgente en la toma de decisiones sobre la gestión regional del agua. De acuerdo con Cruz (2013), existe desabasto de agua en la zona, por lo que la Conagua construyó la presa El Realito. No obstante, los resultados de este estudio indican que en la región no llueve lo suficiente, ya que alrededor de los 40 mm– 50 mm son considerados como eventos extremos y que para la operación de la presa se requiere alcanzar los 50 hm³ (50 000 000 m³) de agua, por lo que no fue viable su ubicación. Esta conclusión fue identificada en otros estudios como Martínez *et al.* (2013). Existen también opiniones encontradas sobre la construcción de la presa entre las personas beneficiadas, a quien se les destinará el recurso agua y los habitantes de la RBSGGto que se vieron afectados por el mal pago de tierras por procesos de expropiación. Con los resultados obtenidos del modelo de balance hídrico de este estudio, la construcción de más obras de almacenamiento de agua puede no ser la mejor solución si se considera que debido al cambio climático existiría un serio problema de evaporación (Martínez *et al.*, 2013). Una opción más adecuada sería trabajar en la recarga de acuíferos como una opción de bajo costo, con alta capacidad, y en donde se evitaría la evaporación, así

también en la recuperación de la calidad del agua en las fuentes superficiales (Delgado, Gay, Imaz & Martínez, 2010; Urbina & Martínez, 2006).

Aunado al problema hídrico, la RBSGGto es además susceptible a la erosión. Al ser una zona con relieve montañoso, la topografía accidentada y su régimen de lluvias es susceptible de sufrir el efecto de la erosión. Se presenta así el riesgo por inestabilidad de ladera, lo que deriva en el uso de mallas de protección para evitar la caída del material (Cruz, 2013). No obstante, en la RBSGGto se cuenta con programas de asociaciones como Suelo Feliz y del Consejo de Agricultura Orgánica y Permacultura (COAS) (Cruz, 2013), que complementan las acciones relacionadas con el uso de mallas para atenuar los deslizamientos. Sin embargo, existen sitios en riesgo, en especial durante la temporada de lluvias, dejando incomunicadas a las comunidades. Por lo anterior, hacen falta trabajos y acciones relacionadas con la erosión del suelo.

Una de las acciones que refuerzan el monitoreo climático en la zonas es la implementación de una red de estaciones meteorológicas dentro de las ANP, una de ellas está localizada dentro del ANP desde 2012 (Conanp / Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C. [FMCN] / *The Nature Conservancy* [TNC], 2011). Además de la identificación climática actual y futura, es necesario continuar el trabajo en la evaluación de las capacidades locales de adaptación. Dado a que la población vive en condiciones de pobreza y marginación, la RBSGGto se considera una zona con una baja capacidad de adaptación al cambio climático, por lo que la fragilidad económica y social son las principales fuentes de vulnerabilidad. Esta alta vulnerabilidad al cambio climático ocasionará graves consecuencias para aquéllos que dependen de los servicios ambientales que proveen los ecosistemas.

Los diagnósticos para la evaluación de la vulnerabilidad son incluidos en diversos programas estatales. Los resultados de este estudio pueden ser de utilidad para que el Programa de Manejo de la Reserva en el componente de mitigación y adaptación al cambio climático, así como para su respectiva Estrategia de Cambio Climático de la Zona y su Programa de Adaptación al Cambio Climático, en sus módulos de escenarios y proyecciones futuras.

CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado aporta un avance en cuanto a la identificación de la vulnerabilidad climática futura en la RBSGGto, ya que se generaron escenarios climáticos regionalizados, por medio del GETM-LARS, con

resultados de una resolución espacial detallada de utilidad para los estudios de evaluación de impactos regionales. A partir de estos escenarios regionalizados se logró comprobar el cambio en el clima para el periodo del 2010 al 2099, y con base en ellos se explica que habrá un impacto debido al cambio climático el cual conllevará a un incremento de los eventos de temperaturas máximas extremas y a un decremento de los eventos de temperaturas mínimas extremas.

Por el incremento de 1 °C a 2 °C con respecto a la temperatura observada, habrá consecuencias en tres presiones que se presentan en la reserva: sequía, erosión y pérdida de la biodiversidad. Debido al incremento de la temperatura, se hace más recurrente e intensa la sequía, lo cual puede reducir la productividad de los suelos, especialmente en las zonas secas de la RBSGGto. La erosión afecta los suelos locales llevándolos a un punto crítico de desertificación, los efectos en primera instancia se reflejarán en la pérdida de la biodiversidad y en el bienestar de las familias que se encuentran dedicadas a la agricultura de subsistencia, poniendo en riesgo su propia seguridad alimenticia. Por estas condiciones, resulta evidente la importancia de establecer medidas de adaptación que sean óptimas y que realmente cumplan con el nivel de compromiso para poder reducir los impactos adversos del cambio climático. Solo por medio de la implementación de las estrategias de adaptación al cambio climático, la población que habita la RBSGGto podrá reducir la vulnerabilidad, además de fortalecer e impulsar medidas que favorezcan una mayor resiliencia de los ecosistemas. Es importante considerar que para implementar una estrategia de adaptación, independientemente de las medidas que se incorporen, siempre van a tener un costo; sin embargo, el costo de la acción siempre será menor que el de la inacción. Finalmente, deberán valorarse la viabilidad, eficiencia y el plazo de dichas medidas de adaptación al cambio climático, así como su incorporación dentro de las políticas de manejo actuales y futuras de la RBSGGto.

AGRADECIMIENTOS

Muy especialmente al Dr. José Antonio Ávalos Lozano (Universidad Autónoma de San Luis Potosí), por su apoyo en el reconocimiento de la problemática y acercamiento con actores clave de la región de estudio. Al Dr. Juan Matías Méndez Pérez (Universidad Veracruzana), al Mtro. Luis Galván Ortiz (Posgrado en Geografía, UNAM), al Ing. Carlos Ábrego (Universidad Autónoma de San Luis Potosí), al Ing. José Fausto Martínez Contreras de la Promotoría del Noreste de CONAFOR y a los habitantes del municipio de Xichú,

a todos ellos un agradecimiento por el apoyo técnico en la metodología, trabajo de campo y entrevistas de este estudio. Al director y subdirector de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda Guanajuato, Ing. Víctor Manuel Ildelfonso Apolinar, y al subdirector Luis Felipe Vázquez Sandoval y al Lic. Francisco Arellano, al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, dentro del proyecto con clave PE301212 “Mejoramiento y Actualización de la Enseñanza en Climatología del Colegio de Geografía”, FFyL, UNAM, así como a los revisores anónimos de este documento, cuyas observaciones contribuyeron a mejorarlo sustancialmente.

REFERENCIAS

- Baede, A., Van der Linden, P., & Verbruggen, A. (Eds.) (2010). *Annex II. Glossary IPCC Fourth Assessment Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC*. Geneva: IPCC.
- Bello, L. (2014). *Escenarios de cambio climático regionalizados para la reserva de la biosfera Sierra Gorda Guanajuato mediante el modelo LARS-WG* (tesis de licenciatura). México: Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Camargo-Bravo, A., & García-Cueto, R. (2011). Evaluación de dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el Valle de Mexicali en México. *Información Tecnológica*, 23(3), 11-20.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC). (2009). *Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012*. México: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2012). *Zonificación primaria*. Comisión de Áreas Naturales Protegidas. México. Recuperado el 23 de agosto de 2012 de <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). (2015). *Estrategia de cambio climático desde las áreas protegidas. Una convocatoria para la resiliencia de México (2015-2020)*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C.-The Nature Conservancy (Conanp-FMCN-TNC). (2011). *Guía para la elaboración de programas de adaptación al cambio climático en áreas naturales protegidas*. México: Conanp.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (s/a). *Estudio técnico justificativo – Construcción de la Presa El Realito y sus acueductos*. México: Conagua.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2012). *La biodiversidad en Guanajuato*. Estudio de estado. México: Conabio.
- Cruz, D. (2013). *Adaptación al cambio climático en el Área Protegida Sierra Gorda Guanajuato* (tesis de licenciatura). México: Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Delgado, G., Gay, C., Imaz, M., & Martínez, M. (coords.) (2010). *México frente al cambio climático retos y oportunidades*. México: UNAM.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2 de febrero de 2007). *Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la zona conocida como Sierra Gorda de Guanajuato localizada en los municipios de Atarjea, San Luis de la Paz, Santa Catarina, Victoria y Xichú, en el Estado de Guanajuato*, México. Recuperado el 13 de julio de 2011 de <http://www.conanp.gob.mx/sig/decretos/reservas/GordaGto.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (Junio, 2012). *Ley General de Cambio Climático*. México: Gobierno de la República. Recuperado el 10 de agosto de 2015 de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (Junio, 2013). *Estrategia nacional de cambio climático Visión 10-20-40*. México: Gobierno de la República. Recuperado el 10 de agosto de 2015 de <http://www.encc.gob.mx/documentos/estrategia-nacional-cambio-climatico.pdf>
- Esquivel-Arriaga, G., Rivera-González, M., Velázquez-Valle, M., Muñoz-Villalobos, A., Macías Rodríguez, H., & Sánchez-Cohen, I. (2014). Modelación del rendimiento del frijol bajo escenarios regionales de cambio climático en la región sureste del estado de Durango. *Agrofaz*, 14(1), 97-106.
- Estrada, F., Guerrero, V., & Gay, C. (2010). Una nueva metodología para realizar downscaling estadístico y para la estimación de impactos potenciales de cambio climático en el consumo de energía en las ciudades. En *VII Congreso de la Asociación Española de Climatología. Clima, Ciudad y Ecosistemas* (pp. 73-82). Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Fernández, F. (1996). *Manual de climatología aplicada. Clima, Medioambiente y planificación*. Madrid: Espacios y Sociedades (Serie Mayor núm. 2).
- Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEG). (2005). *Estudio previo justificativo para el establecimiento del área natural protegida, Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato*. Guanajuato, México: Instituto de Ecología de Guanajuato.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2012). *Información a nivel nacional y estatal*. México. Recuperado el 23 de agosto de 2012 de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx>
- Loss, S., Terwilliger, L., & Petersen, A. (2010). Assisted Colonization: Integrating Conservation Strategies in the face of Climate Change. *Biological Conservation*, 144(1), 92-100.
- Magaña, V. (2010). *Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones*. México: INE. Recuperado el 20 de septiembre de 2012 de <http://zimbra.inecc.gob.mx/escenarios/>
- Martínez, J. C., Ortega-Sánchez, V. M., & Ramos, Y. R. (2013). Índices climatológicos regionales para la Sierra Gorda de Guanajuato. *Acta Universitaria*, 23(6), 10-25.
- Matsuura, W., Willmott, C., & Legate, D. (2009). WebWIMP versión 1.02. Universidad de Delaware. Recuperado el 19 de mayo de 2013 de <http://climate.geog.udel.edu/~wimp/>
- Méndez, J. (2003). *Un estudio de eventos hidrometeorológicos extremos en la República Mexicana*. (Tesis de maestría). Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., De Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H. H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Van Rooijen, S., Nadejda, V., & Zhou, D. (2000). *Informe Especial, sobre escenario de emisiones: Un reporte especial del Grupo III del Panel Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review Ecology Evolution Systematics*, 37(0), 637-669.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2005). *Marco de políticas de adaptación al cambio climático: Desarrollo de estrategias, políticas y medidas*. Nueva York: PNUD.
- Puma, M. J., & Gold, S. (2011). *Formulando escenarios de cambio climático para contribuir con estrategias de desarrollo adaptadas al clima. Una guía para practicantes*. Nueva York: PNUD.
- Sánchez, I., Díaz, G., Cavazos, M., Granados, R., & Gómez, E. (2011). *Elementos para entender el cambio climático y sus impactos*. México: Porrúa.
- Semenov, M. A., & Brooks, R. J. (1999). Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research*, 11(2), 137-148.
- Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., & Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research*, 10(2), 95-107.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2011). *Bases de datos meteorológicos del sistema de clima computarizado CLICOM*. México.
- Sistema Estatal de Información del Agua (SEIA). (2008). *Variabilidad climática en Guanajuato*. Sistema Estatal de Información del Agua. Recuperado el 26 de diciembre de 2013 de SEIA.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor M., & Miller, H. L. (eds.) (2007). *IPCC-WGI Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- Thompson, I. (2012). Biodiversity, ecosystem thresholds, resilience and forest degradation. *Unasylva*, 238(62), 25-30. Recuperado el 15 de octubre de 2012 de <http://www.fao.org/docrep/015/i2560s/i2560s05.pdf>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). (2010). *La serie de soluciones naturales*. Australia: UICN / CMAP.
- Urbina, J., & Martínez, J. (comp.) (2006). *Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global*. México: INE / Semarnat / UNAM.
- Uzeta, J. (2005). El agua como cultura, disputas en torno a un recurso escaso en el noreste de Guanajuato. *Nueva Antropología*, 19(64), 31-51. Recuperado el 21 de mayo de 2013 de <http://www.redalyc.org/pdf/159/15906403.pdf>
- Zermeño, D. (2008). *Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México* (tesis de maestría). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México: México.