

Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztitlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático

Long-term hydrological analysis in the Metztitlán River watershed, Hidalgo, Mexico, and its relationship with climate change

Mayra Mendoza Cariño¹, Ana Laura Bautista Olivas², Abel Quevedo Nolasco¹ y Daniel Mendoza Cariño¹

¹Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, km 36.5, carretera México-Texcoco, 56230, México

²Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, carretera Bahía de Kino-Hermosillo, km 22, Hermosillo, Sonora, 305, México
e-mail: maymc_zaragoza@yahoo.com.mx

Recibido: 18 de noviembre de 2015.

Aceptado: 08 de diciembre de 2017.

Mendoza Cariño M., A. L. Bautista Olivas, A. Quevedo Nolasco y D. Mendoza Cariño. 2018. Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztitlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático. *Hidrobiológica* 28 (1): 17-30.

RESUMEN

Antecedentes. La variabilidad climática y el cambio climático se relacionan con cambios en el régimen del clima, con efectos en el ciclo hidrológico. Las lluvias intensas en cortos períodos en la cuenca de Metztitlán favorecen que el río llene rápidamente su vaso de descarga (lago Metztitlán) y se desborde sobre el distrito de riego 08 y localidades cercanas.

Objetivos. Realizar el análisis hidrológico de largo plazo de la cuenca Metztitlán con la finalidad de identificar signos de cambio climático en términos de la media estadística; definir las cotas de mayor riesgo de inundación para conocer las localidades afectadas y calcular los caudales ambientales y los probables volúmenes de desfogue del río Metztitlán.

Métodos. La tendencia histórica de los escurrimientos del periodo 1937-2008 se estimó con el *software* Regime Shift Detection; los caudales ambientales y volúmenes de desfogue se evaluaron con base en el método Tennant. **Resultados.**

El análisis evidenció, en el régimen de escurrimientos medio anuales, lluvias extremas máximas en 1944, 1955, 1998 y 1999, y mínimas en 1950 y 1997. En el régimen de los escurrimientos medio mensuales se observaron siete y cinco cambios en los cortes de longitud de 10 y 5 años, respectivamente. Estos cambios evidencian una tendencia a la baja de los escurrimientos en el periodo seco, y una tendencia a incrementar en el periodo húmedo de años recientes.

Conclusiones. No se detectaron señales que permitieran vincular estos cambios con el cambio climático, pero se encontró cierta relación con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Las cotas de mayor riesgo por las inundaciones están entre 1246 y 1258 msnm; los poblados susceptibles de sufrir afectaciones son El Pedregal de Zaragoza, San Cristóbal, Tlacotepec, Tlatepexe y Tecruz de Cozapa. Las estimaciones de caudales ambientales indican mayores reservas para septiembre y octubre, así como el desfogue de volúmenes excedentes durante todo el año.

Palabras clave: cambio de régimen climático, inundaciones, método Tennant, probabilidad de excedencia, series de tiempo

ABSTRACT

Background. Climate variability and climate change are related to changes in the climate regime, with effects on the hydrological cycle. The intense rains in short periods in the basin of Metztitlán River cause the river to quickly fill its discharge vessel (Lake Metztitlán) and flood Irrigation District 08 and nearby towns. **Goals.** This study undertook a long-term hydrological analysis of the Metztitlán watershed to identify signs of climate change by looking at statistical means, and it defined the limits of greatest flood risk in order to understand the affected locations. We also calculated the environmental flow and the probable discharge volumes of the Metztitlán River. **Methods.** The historical tendency of the runoffs from 1937 to 2008 was estimated using the Regime Shift Detection software; the environmental flow and the probable discharge volumes were evaluated based on the Tennant method. **Results.** The analysis showed the mean annual runoff regime: Maximum extreme rainfall occurred in 1944, 1955, 1998, and 1999; and minimum rainfall occurred in 1950 and 1997. In the mean monthly runoff regime, seven and five changes were observed in the ten and five-year longitude cuts, respectively. These imply a downward trend of runoffs in the dry period, and an upward trend in the rainy period in recent years. **Conclusions.** We were unable to detect any signs that might have allowed us to link these changes with climate change, although we did find a certain relationship with the El Niño-Southern Oscillation phenomenon. The highest flood risk limits lie between 1246 and 1258 meters above sea level; the susceptible populations are El Pedregal de Zaragoza, San Cristóbal, Tlacotepec, Tlatepexe, and Tecruz de Cozapa. The estimations of environmental flows indicate higher reserves for September and October and the release of excessive volumes throughout the year.

Keywords: change in the climate regime, floods, Tennant method, exceedance probability, time series

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática (VC) y el cambio climático (CC) se asocian a cambios en el régimen del clima y han mostrado efectos notables en el ciclo hidrológico (García-González *et al.*, 2007). La VC, entendida como las modificaciones en las condiciones climáticas medias en todas las escalas temporales y espaciales (Quintero-Ángel *et al.*, 2012), se puede manifestar por fenómenos naturales como el evento cálido de El Niño y su contraparte fría, La Niña, conocidos conjuntamente como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

Quintero-Ángel *et al.* (2012) definen el CC como las alteraciones del clima en grandes intervalos de tiempo (generalmente décadas) y en relación con períodos históricos comparables, asociados a causas antrópicas y naturales (externas o internas a la tierra), con ocurrencias en el pasado geológico. Sin embargo, un amplio consenso científico, con base en modelos matemáticos de 90% de confiabilidad (Santiago *et al.*, 2008) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013) coinciden en que el CC es resultado de las modificaciones en el clima, en preciso vínculo con las actividades humanas. Y es que muchos de los cambios observados desde la década de 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios: la atmósfera y el océano han elevado su temperatura, los volúmenes de nieve y hielo van en descenso, y el nivel del mar y las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) se han incrementado (IPCC, 2013).

Debido a que el CC interactúa con la VC y con otros factores como los GEI, es difícil distinguir entre sus límites y respectivos impactos (García-González *et al.*, 2007), sobre todo en regiones donde se presenta una significativa influencia de la VC en las condiciones corrientes del clima (WMO, 2009). No obstante, se sabe que dichas variaciones generan notables efectos en el ciclo hidrológico y que están estrechamente ligadas a una compleja red de retroalimentación en la que los cambios en el clima inducen modificaciones en los sistemas hidrológicos y éstos, a su vez, a variaciones climáticas como: cambios en el vapor de agua (efecto invernadero), en las nubes (albedo y efecto invernadero), en la temperatura del océano, almacenamiento de calor y transporte, escorrentía, humedad del suelo (balance de calor superficial) e interacciones entre los ciclos del agua y del carbono (García-González *et al.*, 2007). Los análisis científicos señalan una tendencia creciente en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos asociados al CC en los últimos 50 años (IPCC, 2013).

En este contexto, los cambios en la magnitud y la frecuencia de las inundaciones y sequías se pueden analizar por medio de series climáticas e hidrológicas largas para cuantificar la persistencia de patrones de circulación atmosférica anómalos en el pasado: los impactos del CC sobre los extremos hidrológicos pueden afectar el número de episodios de caudal extraordinario que se producen en un año, su frecuencia interanual, la duración y el volumen de los hidrogramas, así como los caudales punta que se registran (Benito, 2005).

Las inundaciones provocan los mayores desastres en el mundo (Zhang & Singh, 2005) y equivalen a 50% de las catástrofes con significativo impacto en la sociedad (CRED, 2009) debido a su efecto en los territorios densamente poblados (Garnica & Alcántara, 2004). En 2014, estos eventos afectaron a 42.3 millones de personas en el mundo y ocasionaron pérdidas económicas por 37.7 billones de dólares (Guha-Sapir *et al.*, 2015).

Los resultados del estudio de México sobre el CC presentados en la primera comunicación nacional del país sugieren que las variaciones en el ciclo hidrológico se asocian con el ENSO y que El Niño es el principal modulador de lluvias en el país (Magaña y Gay, 2002). Según Santiago *et al.* (2008), en 2008 se registró un número superior de lluvias torrenciales en el país con respecto a los últimos 10 años.

El sector agrícola es vulnerable a los efectos de inundaciones, vientos, lluvias y temperaturas extremas (Ponvert-Delisles *et al.*, 2007), por lo que la presencia en forma extraordinaria de estos fenómenos naturales lo afecta gravemente. En este sentido, la ocurrencia de lluvia intensa en cortos períodos en la cuenca de Metztitlán favorece que el río llene rápidamente su vaso de descarga (lago Metztitlán) y se desborde sobre el distrito de riego 08 (DR-08), ubicado dentro de la Reserva de la Biosfera de la Barranca de Metztitlán (RBBM), que ocupa 5 837 hectáreas. El DR-08 maneja dos ciclos de cultivo bajo riego (otoño-invierno y primavera-verano) y segundos cultivos que permiten obtener, en conjunto, una elevada producción de calabacín, ejote, frijol, maíz y sorgo. Entre sus cultivos perennes destacan el nogal, el aguacate y frutas como durazno y granada. En el ciclo 2013-2014 generó un rendimiento de 45 364 toneladas, lo que equivale a aproximadamente 200 millones de pesos (CONAGUA, 2015).

La cuenta de Metztitlán destaca por su importancia económica y valor ecológico; sin embargo, presenta inundaciones recurrentes, las cuales provocan severas afectaciones al sistema productivo, al sector social y al medio ambiente. Ejemplo de ello es el evento ocurrido en 1999, el cual, con precipitaciones correspondientes a un periodo de retorno de 20 años, cubrió 4 200 hectáreas (66% de la superficie del DR-08 y 34% de la RBBM).

Pese a la operación de dos túneles de desfogue en el lago hacia el río Almolón (túnel uno y dos, cota 1 256.8 y 1 244.8 msnm; gasto máximo de desfogue de 53 y 11 $m^3 s^{-1}$, respectivamente –CONAGUA, 2003–; inicio de operaciones, año 1937, –Ramírez & Cuevas, 2014–), se logró evacuar el agua en 6 meses; el volumen acumulado (470 Mm^3) superó nueve veces la capacidad del lago (52 Mm^3 , cota 1 246.2 msnm; $\pm 1 240$ ha), lo que ocasionó pérdida de cultivos; daños a la infraestructura productiva y de agua potable; aislamiento de las poblaciones por meses; pérdidas económicas considerables y daños a la biodiversidad (CONAGUA, 2003). Y es que el lago está considerado como un sitio Ramsar (RAMSAR, 2007); es decir, un humedal de importancia para las aves migratorias en la RBBM. Además, el lago realiza varias funciones ecosistémicas: retiene nutrientes y sedimentos, recarga el acuífero subterráneo, estabiliza las condiciones climáticas locales y es fuente de riqueza biológica y genética.

Para solucionar parte de los efectos sociales y económicos de las inundaciones, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) propuso construir un tercer túnel de desfogue, el cual se establecería a un nivel inferior de los dos túneles existentes (cota 1 241.5 m) y liberaría los volúmenes de agua excedentes a la cota 1 244.8: 250 $m^3 s^{-1}$, en 13 días, y 880 $m^3 s^{-1}$, en 60 días (con un gasto máximo de desfogue de 112.5 $m^3 s^{-1}$). No obstante, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales tiene interés en evitar el nivel excesivo de agua, que, en caso de ocurrir, afectaría a la biodiversidad de la RBBM que se beneficia del lago.

Por lo tanto, los objetivos de esta investigación fueron: 1) realizar el análisis hidrológico de largo plazo de la cuenca del río Metztitlán con la finalidad de identificar signos de cambio climático en términos de la media estadística, mediante la estimación de la tendencia his-

tórica de los escurrimientos del periodo 1937-2008, con el *software* Shift Detection (Rodionov, 2004); 2) definir las cotas de mayor riesgo de inundación para conocer las localidades afectadas y 3) estimar el caudal ambiental del río Metztitlán con base en el método Tennant, así como los probables volúmenes de desfogue, a fin de resguardar la salud del ecosistema.

Cabe mencionar que, si bien existieron limitaciones por la falta de datos hidráulicos y biológicos de la cuenca, la disponibilidad de registros hidrológicos favoreció el empleo del método Tennant, el cual, de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012), permite determinar el caudal ambiental de un cuerpo corriente, y asegura la protección de sus condiciones ambientales y equilibrio ecológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio. La cuenca del río Metztitlán se ubica entre las coordenadas $19^{\circ} 53' 41''$ y $20^{\circ} 45' 05''$ latitud norte, y $98^{\circ} 55' 04''$ y $98^{\circ} 08' 39''$ longitud oeste; abarca una superficie de 277 236.14 hectáreas y presenta un gradiente altitudinal entre 1 246 (lago de Metztitlán) y 3 100 msnm (sierra de Singuilucan) (Fig. 1).

La vegetación se determina por el efecto barlovento-sotavento (Barradas *et al.*, 2004). En los bordes de la cuenca (barlovento), las

montañas captan la mayor parte de la lluvia (al noreste, Zacualtipán y Agua Blanca; al sureste, Acaxochitlán; al sur, Singuilucan, y al suroeste la sierra de Pachuca), lo que permite el desarrollo de bosques de clima templado (mesofílo de montaña, de *Pinus* y *Pinus-Quercus*). En la parte interna de la cuenca (sotavento), el viento presenta poca humedad por el efecto llamado “sombra geográfica”, lo que aunado a la escasez de precipitaciones favorece el crecimiento de matorral xerófilo crassicaule, espinoso y rosetófilo (López-Herrera *et al.*, 2015).

El lago se encuentra entre los municipios Metztitlán y Eloxochitlán, en la parte norte de la RBBM, en el estado de Hidalgo, entre los $20^{\circ} 31'$ y $20^{\circ} 43'$ LN, y $98^{\circ} 37'$ y $98^{\circ} 52'$ LO, a $\pm 1 246$ msnm (considerando su almacenamiento promedio de 52 Mm^3).

El lago pertenece a la Región Hidrológica 26 Alto Pánuco y su aporte principal es el río Venados (río Grande Tulancingo, al sur, y río Metztitlán, al norte de la RBBM), cuya longitud aproximada es de 100 km dentro de la cuenca. Eventos tectónicos ocurridos en el periodo geológico del Cuaternario tardío sugieren que el cerro El Tajo se derrumbó y bloqueó el río que corría sin restricciones, lo que conformó una represa natural: el lago Metztitlán (Suter, 2004).

La agricultura, principal actividad económica de la región, es desempeñada por 73% de la población (López-Herrera *et al.*, 2015). Se siembra calabaza, chile verde, ejote, frijol, jitomate, maíz y sorgo, entre

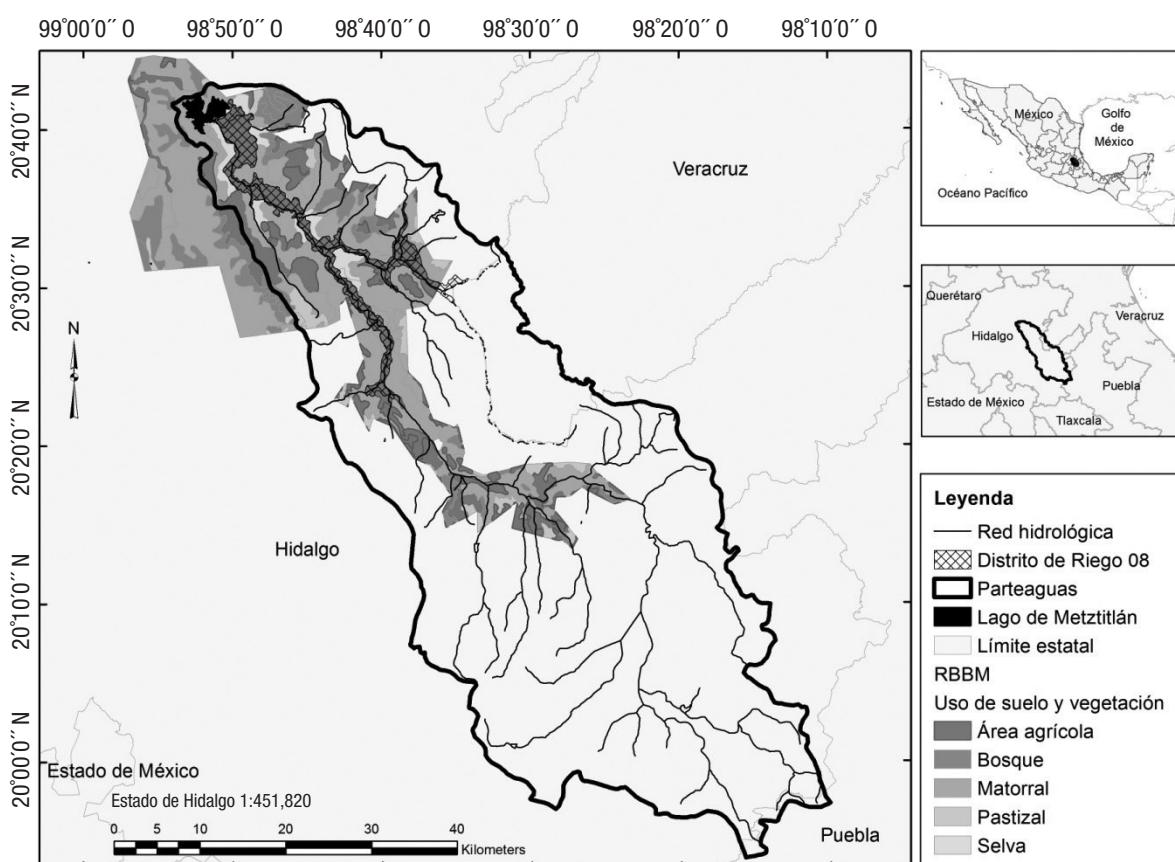


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río de Metztitlán, en Hidalgo, México.

otros cultivos; el nogal es distintivo de la zona. Así, el DR-08, que opera esencialmente bajo riego, es de relevancia en el estado de Hidalgo.

Sin embargo, las inundaciones constituyen un problema frecuente en Metztitlán; al llenarse el vaso del lago, éste se desborda desde la parte sureste de la cuenca hasta la noroeste. Los eventos más recientes se presentaron en 1999 y 2005: el primero alcanzó a la comunidad de Venados y cubrió gran parte del DR-08; el segundo afectó al poblado de Jilotla, con menor intensidad y magnitud (López-Herrera *et al.*, 2015).

La cuenca tiene un coeficiente de escurrimiento superficial de 0-5% (CONANP, 2003); el clima que predomina es BS_0hw (seco semicálido), con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal entre cinco y diez, e invierno fresco (García, 2004; SPP, 1992). La precipitación media anual es entre 450 y 700 mm en las áreas de mayor altitud (CONANP, 2003). Los principales tipos de suelo en la cuenca son litosoles, rendzinas, regosoles, fluvisoles, feozems y vertisoles (CONANP, 2003); en las márgenes del río Metztitlán destaca el fluvisol calcárico (SPP, 1992).

Tendencia histórica de los escurrimientos en la cuenca Metztitlán, 1937-2008. Existen diversos métodos diseñados para detectar cambios de régimen en series temporales. El Sequential Regime SHIFT Detection (Rodionov, 2004; Bering Climate, 2006) es un *software* que permite indicar la posibilidad de dicho cambio en tiempo real y estudiar variables de tipo físico (como la cobertura de hielo), biológico (como la biodiversidad y biomasa de zooplancton), climático (como el fenómeno ENSO y la oscilación del Pacífico Norte) y sus combinaciones. El programa tiene ventajas sobre otros métodos: señala la emergencia de un cambio potencial y mide el rango de confianza en la evidencia de un dato nuevo con respecto al anterior (Rodionov y Overland, 2005). Debido a esto, a la flexibilidad para el manejo de datos y a su adaptabilidad

a la zona de estudio –no requiere mayor cantidad de información–, se utilizó el Shift Detection para identificar en el régimen de escurrimientos de la cuenca los cambios significativos en términos de la media, así como la magnitud de las fluctuaciones del periodo 1936-2008.

El programa se fundamenta en las diferencias de los niveles promedio de una variable climática determinada X (por ejemplo: lluvia, velocidad del viento, presión barométrica, temperatura, entre otros) en una serie de tiempo (duración multianual), y se apoya en la prueba estadística t de Student. En el conjunto de datos de dos extremos, se examinaron cortes de longitud de análisis de 5 (CL5) y de 10 años (CL10), con una probabilidad = 0.1, donde el menor corte permite observar mayor detalle en la magnitud del cambio. El programa identifica los cambios en el régimen de la serie de tiempo mediante las siguientes etapas: 1) Establece la longitud de corte (l ; 5 o 10 años) de los regímenes por evaluar para la variable X (escurrimientos). 2) Determina la diferencia ($diff$) entre valores medios de dos regímenes subsecuentes, que pueden ser estadísticamente significantes de acuerdo con la prueba t de Student:

$$diff = t \sigma l^2 \quad l \quad diff = t \sigma l^2 \quad l \quad (1)$$

Donde t es el valor de la distribución $-t$ con $2l - 2$ grados de libertad al nivel de probabilidad dada p . El programa asume que las varianzas de ambos regímenes son similares e iguales a la varianza promedio σl^2 para los intervalos de corte de longitud l en la serie de tiempo de la variable X . 3) Calcula la media ($XR1$) de los valores del corte de longitud inicial l de la variable X , como una estimación para el régimen R1, y los niveles que deben ser alcanzados en los años del subsecuente corte de longitud l , a fin de evaluar un cambio para el régimen R2, ($X'R2 = XR1 \pm diff$).

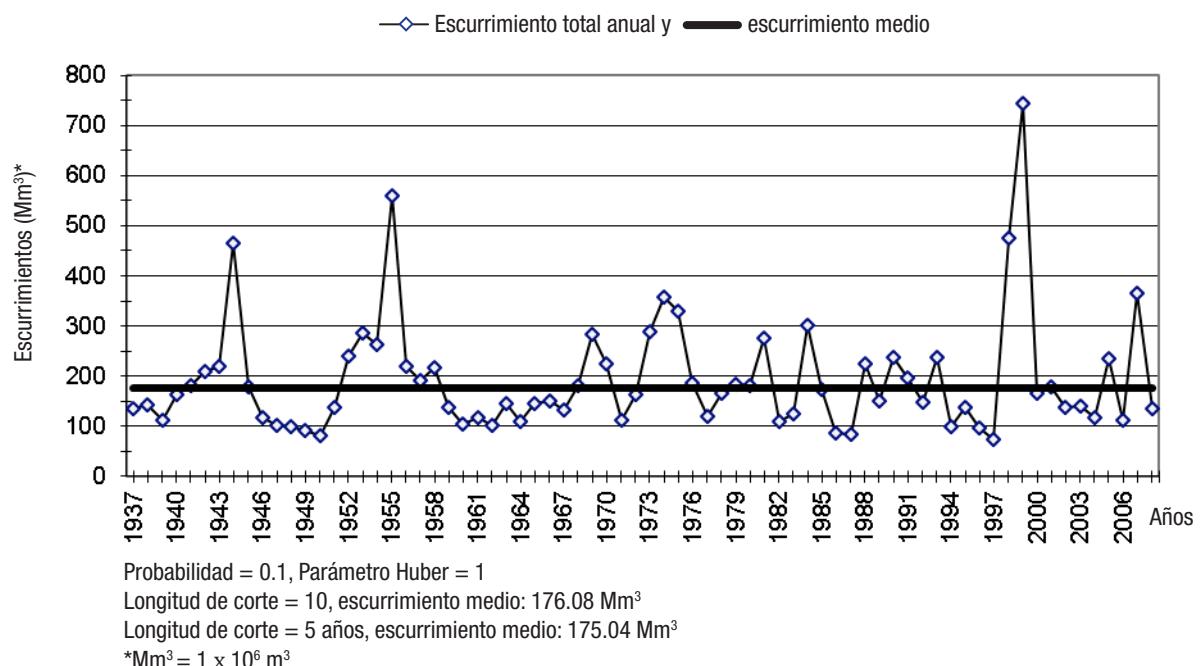


Figura 2. Régimen de escurrimientos totales anuales (1937-2008) de la cuenca Metztitlán, en Hidalgo, México.

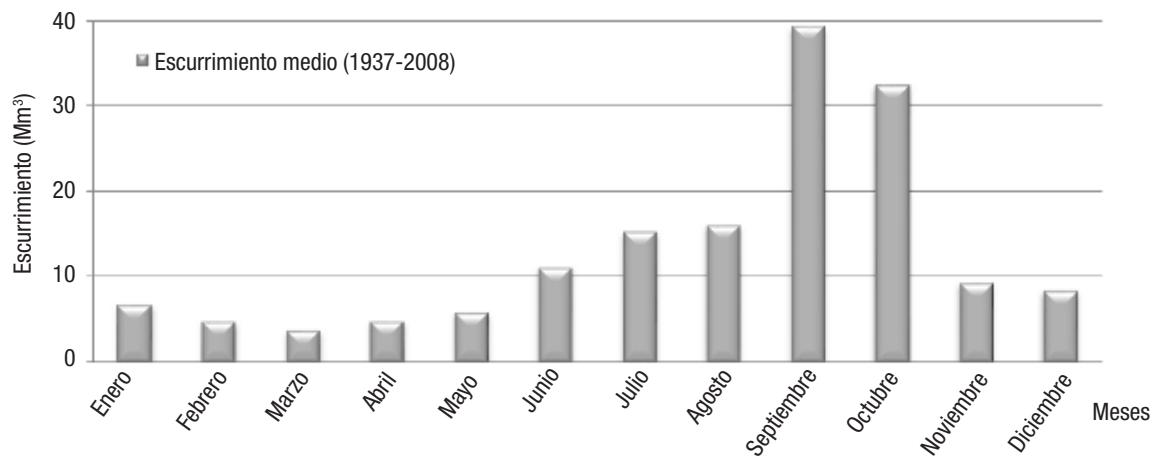


Figura 3. Escurrimiento promedio mensual (1936-2008) de la cuenca Metztitlán, en Hidalgo, México; datos estimados con el corte de longitud de 5 años.

4) Para cada nuevo valor comenzando en el año $i=l+1$, se verifica si éste es mayor que $XR1 + diff$ o menor que $XR1 - diff$. Si éste no excede el rango $XR1 \pm diff$, se asume que el régimen no ha cambiado. En dicho caso, se calcula de nuevo el promedio $XR1$ para incluir el nuevo valor Xi y los valores previos de $l-1$ de la variable X , y se espera el siguiente valor. Si el nuevo valor de Xi excede el rango $XR1 \pm diff$, este año se considera como un posible punto de inicio (j) para el nuevo régimen R2. 5) Despues de que este punto se establece, cada nuevo valor de Xi , donde $i > j$, se usa para confirmar o rechazar la hipótesis nula de un cambio de régimen en el año j . Si la anomalía $Xi - X'R2$ es del mismo signo que al momento del cambio de régimen, se incrementa la confianza de que el cambio sí ocurrió. Es todo lo contrario si las anomalías tienen signos opuestos. Este cambio en la confiabilidad de un cambio de régimen en $i=j$ se refleja en el valor del índice de cambio de régimen (RSI, por sus siglas en inglés), el cual representa una suma acumulada de anomalías normalizadas:

$$RSIi, j=i-j+mXi*l\sigma l, m=0, 1, \dots, l-1 \quad (2)$$

Aquí $Xi = Xi - X'R2$ si el cambio es ascendente, o $Xi = X'R2 - Xi$ si el cambio es descendente. El RSI toma valores entre -1.0 y 1.0, donde la cercanía a cero indica la ausencia de cambios en el régimen. Si en algún momento, desde que $i=j+1$ pasa al siguiente $i=j+l-1$, el valor del índice RSI se torna negativo, se procede al paso 6; si es positivo, al paso 7.

6) El valor negativo del RSI significa que la prueba para un cambio de régimen en el año j falló. Se asigna cero al RSI y se calcula de nuevo el valor medio de $XR1$ para incluir el valor de Xj y seguir probando los valores de Xi , comenzando con $i=j+1$ para estimar la excedencia del rango $XR1 \pm diff$, como en el paso 4.

7) El valor positivo del RSI significa que el cambio en el régimen en el año j es significativo al nivel de probabilidad p (0.1). Se calcula el valor medio real para el nuevo régimen $XR2$. Este punto se convierte en la base a partir de la cual la prueba sigue adelante. La búsqueda

del siguiente cambio de régimen R3 comienza con el año $i=j+1$. Se regresa a este paso a fin de asegurar que el siguiente cambio de régimen en la serie se determine correctamente, incluso si la duración actual de régimen R2 fuera menor que los años del corte de longitud l . Los cálculos se continúan repetidamente del paso 4 al 7, hasta que se procesan todos los datos disponibles para la variable X .

Debido a los valores atípicos, el promedio no es representativo para el valor medio de los régímenes, lo que puede afectar significativamente los resultados de la detección del cambio de régimen. Idealmente, el peso para el valor de datos debe ser elegido de tal manera que sea mínimo si ese valor se considera como atípico. Para manejar los valores atípicos, el programa utiliza la función de peso de Huber (Bering Climate, 2006), que se calcula como:

$$peso = \min(1, parámetro / (anomalía)) \quad (3)$$

Donde la *anomalía* es la desviación del valor medio esperado del nuevo régimen, normalizado por la desviación estándar promediada para todas las secciones consecutivas, del corte de longitud en la serie de datos. Si éstas son menores o iguales al valor del parámetro, sus pesos son iguales a uno. De lo contrario, los pesos son inversamente proporcionales a la distancia del valor medio esperado del nuevo régimen. Despues de que se determina el cambio de régimen en la serie, los valores medios de los régímenes se determinan mediante un procedimiento iterativo: primero se calcula una media aritmética simple (sin peso), como una estimación inicial del valor medio del régimen; luego se calcula una media ponderada con los pesos, determinados por la distancia desde la primera estimación. El procedimiento se repite una vez más con la nueva estimación de la media del régimen.

Relación elevaciones-áreas-capacidades del lago Metztitlán. Ésta se determinó con base en información proporcionada por la CONAGUA (2008), a fin de conocer las cotas susceptibles de resultar afectadas ante la presencia de eventos extraordinarios.

Cálculo de la probabilidad de los escurrimientos mensuales y balance hídrico. La probabilidad de los escurrimientos mensuales de la serie cronológica 1937-2008 se calculó mediante la fórmula de probabilidad de excedencia (PE) (Weibull, 1939):

$$\text{Probabilidad de excedencia} = mn+1 \quad (4)$$

Donde m es el número ordinal del miembro de la serie cuando los elementos son ordenados en forma descendente, y n el número de años de observación. El balance hídrico se realizó a partir de los volúmenes que corresponden a una PE de 80%, a los que se les restó el valor medio de los volúmenes mensuales que se extrajeron del río Metztitlán (para beneficio del DR-08) correspondientes al periodo 2005-2008 (se consideró ese intervalo de tiempo por el acceso a la información). Después se sumó a la disponibilidad de agua en el lago del mes anterior, más el escurrimiento medio aportado en el mes actual, menos las extracciones medias de uso agrícola para el mismo periodo. Los volúmenes de desfogue se determinaron mediante la diferencia de los volúmenes promedio mensuales disponibles y el caudal medio mensual-rango óptimo (CMM-RO).

Caudales ecológicos y probables volúmenes de desfogue. El caudal ambiental es un instrumento de la gestión del agua que, con base en el principio ecológico del régimen natural y el gradiente del estado biológico, tiene por objetivo establecer un régimen para el sostenimiento de los ecosistemas y usos del agua. Numerosas metodologías se utilizan para este fin: hidrológicas (estiman dichos caudales mediante el estudio de una serie de valores históricos), holísticas (se emplean en cuencas cuyas características se transforman a causa de grandes

presas que provocan gran variabilidad en el régimen de caudales) y de simulación del hábitat (generan un análisis detallado del hábitat físico disponible y el necesario para la biota a diferentes condiciones de flujo, pero requieren datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos).

En este análisis se empleó el método Tennant (1976), ya que es ampliamente usado en la planeación a nivel de cuencas hidrográficas (Acreman & Dunbar, 2004) cuando hay pocos datos disponibles y porque la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (Secretaría de Economía, 2012) lo recomienda para establecer el régimen de caudal que mantiene los atributos biológicos en ciertos niveles de sobrevivencia, por lo que su uso admite un primer acercamiento al caudal ecológico que demanda la normativa ambiental mexicana.

Dicho método se fundamenta en el grado de conservación del hábitat del sistema hidrológico, el cual depende de su reserva ambiental hídrica en los períodos seco (PS) y húmedo (PH). Se expresa en porcentajes de su caudal medio anual (CMA) histórico: el CMA mínimo (10%) es el necesario para sostener un ecosistema que favorece la sobrevivencia de la mayoría de las formas de vida acuática en el corto plazo; el CMA excelente (30%) mantiene un medio adecuado para la sobrevivencia de las diversas formas de vida acuática, y el CMA rango óptimo (60-100%) provee un hábitat de características excepcionales a excepcionales para la mayoría de las formas de vida acuática. En esta investigación se estimó el CMM-RO (versión modificada), con base en los escurrimientos medios mensuales del periodo 1937-2008 (obtenidos con el CL5).

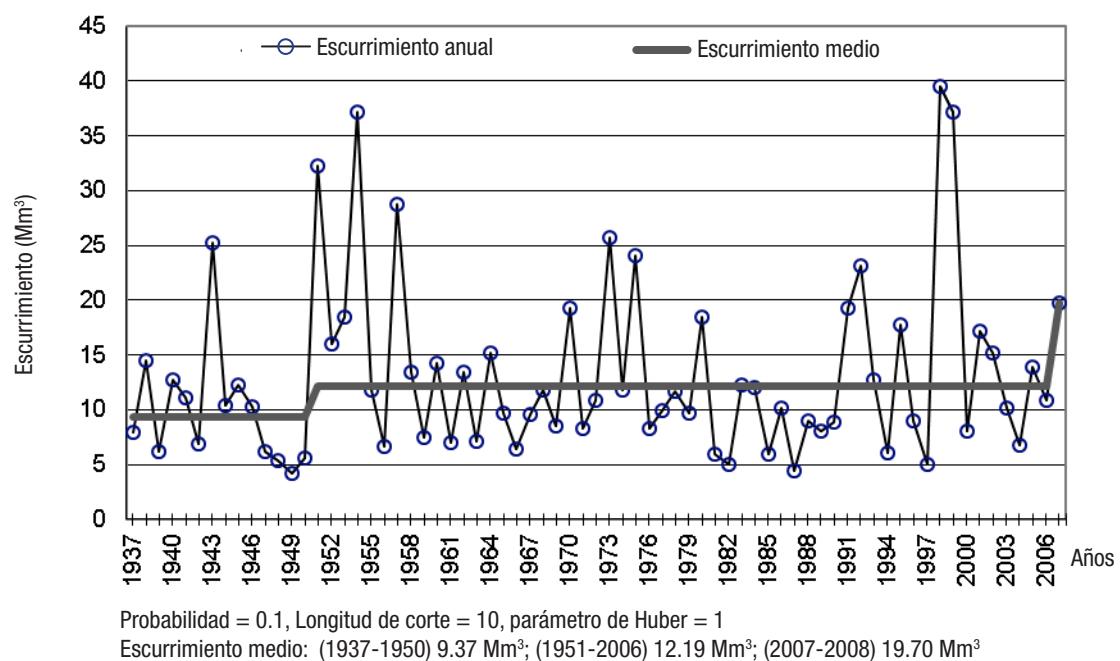


Figura 4. Cambios en el régimen de los escurrimientos medios de noviembre de la cuenca Metztitlán en Hidalgo, México, de 1937-2007 (longitud de corte: 10 años).

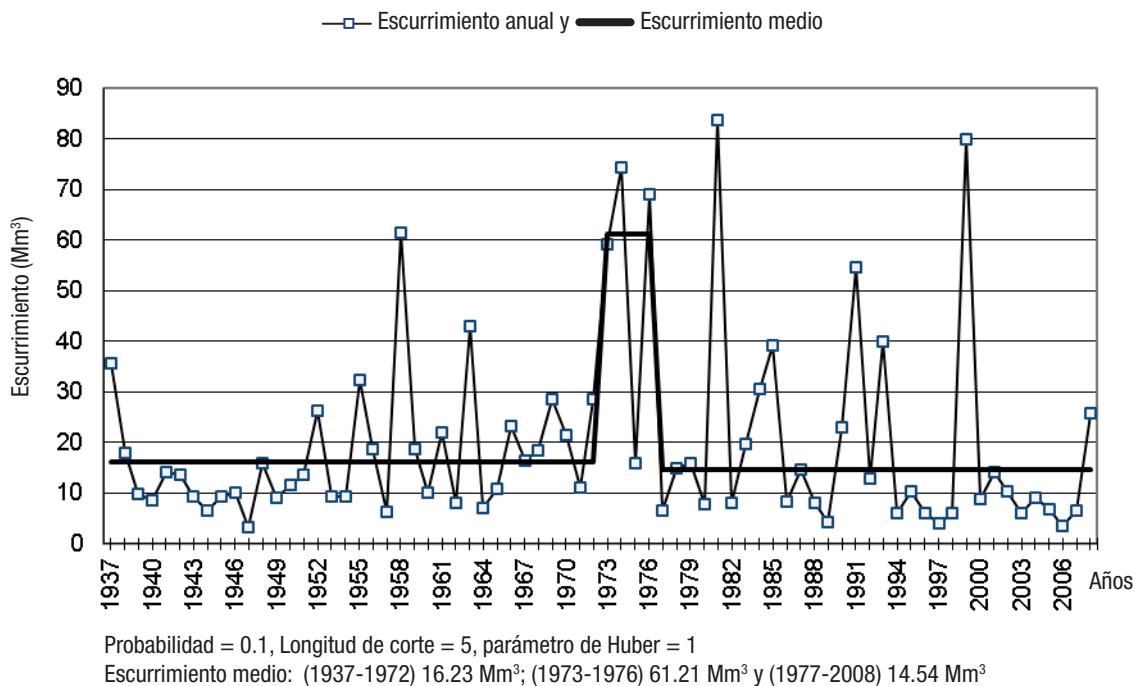


Figura 5. Cambios en el régimen de los escorrentimientos medios de julio (1937-2008) de la cuenca Metztitlán, en Hidalgo, México (longitud de corte: 5 años).

RESULTADOS

Tendencia histórica de los escorrentimientos. En la figura 2 se muestran las fluctuaciones de los escorrentimientos totales anuales (ETA) de la cuenca para el periodo 1937-2008. Los mayores se registraron en los años 1944 (465.3 Mm³), 1955 (560.1 Mm³), 1998 (474.7 Mm³) y 1999, siendo éste el más intenso (744 Mm³). En contraparte, los años de menor ETA son 1950 (81.8 Mm³) y 1997 (73.28 Mm³). Según el Shift Detection, no se detectaron cambios en el régimen de los escorrentimientos medios anuales (REMA), los que equivalen a 176.08 Mm³ y 175.04 Mm³ conforme los CL10 y CL5 años, respectivamente.

Los escorrentimientos promedio mensuales de la serie cronológica sugieren que el PS se integra por los meses enero a mayo, cuyos valores extremos corresponden a enero (6.8 Mm³) y marzo (3.8 Mm³) (Fig. 3). El PS incluye 14.33% del ETA. El PH se define de junio a diciembre, en el que septiembre (39.5 Mm³) y octubre (32.5 Mm³) muestran los mayores escorrentimientos; y diciembre, el menor (8.4 Mm³). El PH reúne 85.67% del ETA.

Al realizar los CL10 para los regímenes mensuales del periodo señalado, se detectaron siete cambios (Tabla 1). Dos de ellos corresponden al PS y representan disminuciones de baja intensidad con respecto al valor medio de los escorrentimientos, que en términos de la magnitud de cambio del RSI (escala de -1.0 a 1.0) equivalen a -0.04 para marzo de 1986 y -0.05 para mayo de 1995. Los cambios restantes (uno en el PS y cuatro en el PH) implican incrementos sobre el valor del escu-

rrimiento medio, como los que se relacionan al mes de noviembre, de magnitud de 0.05 y 0.14 (Tabla 1) para los años 1951 y 2007 (Fig. 4). El incremento de mayor magnitud, de acuerdo con el CL10, corresponde a diciembre de 2007 (0.21).

En el CL10, los RSI de mayor y menor significancia (en la escala -1.0 a 1.0, donde la cercanía a cero indica la ausencia de cambios en el régimen) se asocian a los años 2007 (0.67 –febrero, agosto, noviembre y diciembre-) y 1986 (0.04 –marzo–) (Tabla 1).

En el CL5 se observaron cinco cambios: dos de ellos implican disminuciones importantes con respecto al valor medio de los escorrentimientos, que, en términos de la magnitud de cambio del RSI, equivalen a -0.63 y -0.32 para julio (PH) de 1977 y marzo (PS) de 1987, respectivamente (Tabla 1). Los demás cambios implican aumentos sobre el valor del escorrentimiento medio (dos en el PH y uno en el PS). En la figura 5 se observan dos alteraciones en el régimen de los escorrentimientos medios mensuales (REMM) de julio para 1973 (magnitud de cambio 0.29) y 1977 (-0.63).

En el CL5, los RSI de mayor y menor significancia se relacionan con julio de 1997 (0.67) y marzo de 1992 (0.1) (Tabla 1).

Áreas inundables en la cuenca de Metztitlán. En la figura 6 se observa el área inundable del lago y su capacidad de almacenamiento. Éste abarca 1 208 ha a la cota 1 246 (52 Mm³), la cual se incrementa a 1 572.83 ha a la cota 1 248 (76.15 Mm³). Es decir, la superficie del

lago crece sólo en este intervalo de 2 metros, 364.88 ha (Δárea). Los siguientes aumentos significativos en el área de desborde (superiores a 200 ha) se presentan entre los rangos de cota: 1 248-1 250, Δárea = 631.47 ha; 1 250-1 252, Δárea = 294.54 ha; 1 252-1 254, Δárea = 394.68 ha; 1 254-1 256, Δárea = 230.72 ha; 1 256-1 258, Δárea = 240.81 ha; y 1 262-1 264, Δárea = 391.45 ha.

Caudal ambiental rango óptimo y probables volúmenes de desfogue. En el contexto de los escurrimientos calculados con una PE de 80% del periodo 1936-2008, septiembre presentó los mayores escurrimientos (102.1 Mm³); octubre, los menores (65.6 Mm³), y los demás meses, valores ± 70 Mm³ (Fig. 7). Conforme el programa de cultivos del DR-08, los volúmenes mensuales promedio que se extrajeron del río Metztitlán oscilaron durante los años 2005-2008: los meses de menor demanda correspondieron a junio y octubre (1.4 Mm³); y los de mayor requerimiento, a enero (3.6 Mm³), febrero (3.4 Mm³), marzo (4.1 Mm³), abril

(3.6 Mm³) y septiembre (3.5 Mm³). Los resultados del balance hídrico indican que octubre (64.2 Mm³) y septiembre (98.6 Mm³) registran los valores extremos en torno a la disponibilidad de agua; de diciembre a junio, ésta se evaluó en ± 70 Mm³.

Las estimaciones de los CMM-RO señalaron marcadas diferencias mensuales: los mayores caudales corresponden a septiembre (23.7 Mm³) y octubre (19.5 Mm³); entre 5 y 10 Mm³, noviembre, diciembre, junio, julio y agosto; y menores a 5 Mm³, enero a mayo (Fig. 7). El CMM-RO de septiembre corresponde a una cota y área inundable de 1 243.47 m y 772.9 ha. Marzo presentó el menor de todos los caudales (2.3 Mm³), se aproxima a la cota 1 239 y ocupa 278.12 ha.

Según la CONAGUA, el túnel propuesto podría tener un nivel máximo de aguas de operación (NAMO) a la cota 1 244.8 m, lo que implica un área de 1 003 ha.

Tabla 1. Magnitud del cambio en el escurrimiento medio de la cuenca de Metztitlán (Hidalgo, México) y valores de índice de cambio de régimen (RSI); cortes de longitud de 10 y 5 años.

Corte de longitud de 10 años				Corte de longitud de 5 años			
Año	Mes	Magnitud de cambio	RSI	Año	Mes	Magnitud de cambio	RSI
1951	Noviembre ²	0.05	0.05	1951	Noviembre ²	0.20	0.20
1986	Marzo ¹	-0.04	0.04	1973	Julio ²	0.29	0.29
1995	Mayo ¹	-0.05	0.05	1977	Julio ²	-0.63	0.63
2007	Febrero ¹	0.13	0.67	1987	Marzo ¹	-0.32	0.32
2007	Agosto ²	0.18		1992	Marzo ¹	0.10	0.10
2007	Noviembre ²	0.14					
2007	Diciembre ²	0.21					

¹ = periodo seco (enero a mayo); ² = periodo húmedo (junio a diciembre); RSI = índice de cambio de régimen.

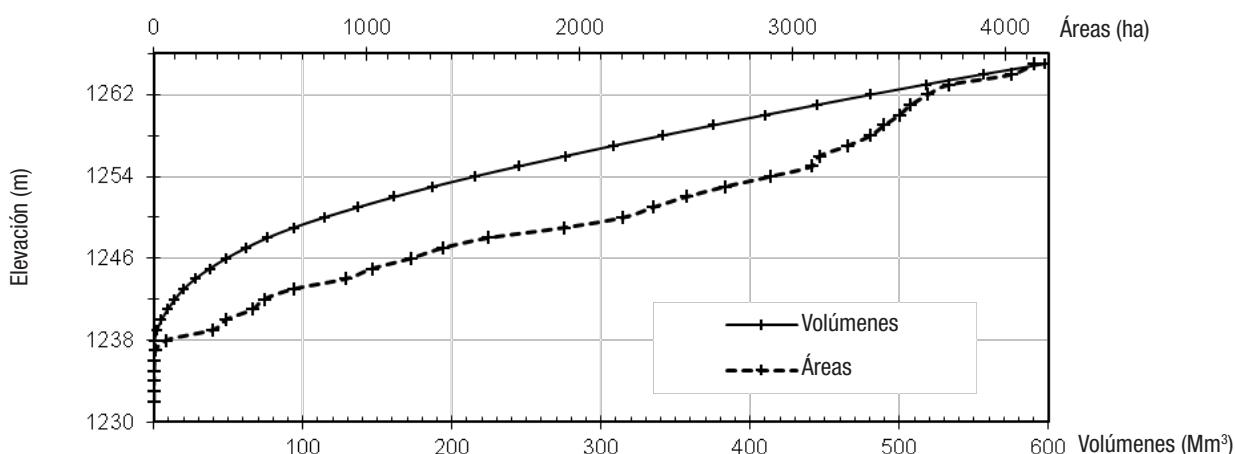


Figura 6. Curvas de elevaciones-áreas-capacidades para el lago de Metztitlán, en Hidalgo, México.

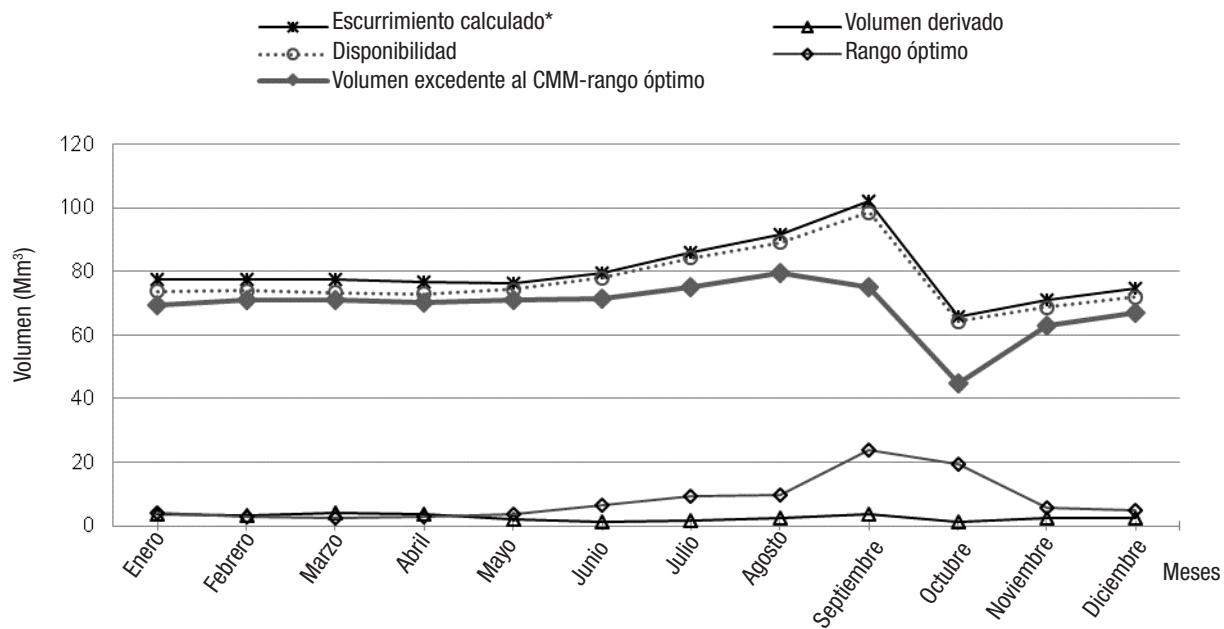


Figura 7. Volúmenes de desfogue excedentes al caudal ambiental de rango óptimo del lago de Metztitlán, en Hidalgo, México. *Con probabilidad empírica de 80%.

DISCUSIÓN

La VC es cada vez más notable, ya que la acumulación de los GEI en la atmósfera incrementa la temperatura del aire y del océano, lo que favorece la variabilidad natural. En consecuencia, en los últimos años se han presentado cambios climáticos inusuales a nivel mundial, como las modificaciones en los patrones de la lluvia y de los caudales de los ríos. Mendoza *et al.* (1997) mencionan que uno de los principales efectos del CC es la alteración del ciclo termo-hidrológico regional, acompañado de cambios en el escorrentimiento superficial; éstos, a su vez, inciden en la distribución espacial y temporal y en los cambios de la magnitud y frecuencia de los eventos extremos, como sequía e inundaciones. Sin embargo, para evidenciar la existencia de un CC es necesario analizar la tendencia de variables climáticas, considerando diferentes escalas de tiempo y espacio.

En este sentido, al analizar la secuencia histórica de los escorrentimientos de la cuenca Metztitlán, los CL10 y CL5 años del Shift Detection no detectaron cambios en el REMA (Fig. 2), pero permitieron identificar en qué años se presentaron escorrentimientos extremos: los mayores, en 1944, 1955, 1998 y 1999; y los menores, en 1939, 1950 y 1997. Se observó que algunos de los años con valores de escorrentimiento extremo (máximos o mínimos) coincidieron con períodos en los que se presentó el fenómeno ENOS: destacaron los años 1998, que registró escorrentimientos máximos en la serie y concordó con uno de los episodios de mayor magnitud de ese evento (1997-1998), y los años 1939 y 1997, que mostraron los menores escorrentimientos de la serie y que correspondieron con el evento de magnitudes fuerte y muy fuerte, respectivamente (Tabla 2).

Por su parte, los CL10 y CL5 señalaron siete y cinco cambios en el REMM (Tabla 1); ambos revelaron un incremento en marzo de 1951 (de magnitud 0.05 y 0.20). De acuerdo con las fluctuaciones observadas en los dos cortes, el valor del escorrentimiento medio tiende a disminuir

en el PS (años 1977, 1986, 1987 y 1995) y al incremento en el PH (años 1951, 1973, 1992), y con mayor intensidad en fecha reciente (año 2007). Esto implica que, de conservarse esta tendencia, habrá condiciones más extremas: meses secos con disminuciones y meses húmedos con un incremento en los escorrentimientos.

Los años que se detectaron en ambos cortes también coinciden con períodos en los que se registró El Niño (Tabla 2). Tal es el caso de los ciclos 1997-1998 y 1998-1999, cuando se presentaron El Niño y La Niña, respectivamente, lo que sugiere que, además de otras influencias climatológicas cíclicas o no (como los ciclones que aumentan el volumen del lago Metztitlán), El Niño se puede relacionar con sequías en la región, y La Niña, con las inundaciones (CONANP, 2003).

De acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon *et al.*, 2007), los cambios en la precipitación y en la temperatura inducen a modificaciones en los escorrentimientos superficiales. Méndez *et al.* (2008) señalan la tendencia de la lluvia en México (periodo 1920-2004). Particularmente en la zona que se ubica la cuenca de Metztitlán, las estaciones de primavera (marzo-mayo) y verano (junio-agosto) presentan tasas a la baja en términos de lluvia, de $-2.45 \pm 0.88 \text{ mm año}^{-1}$ y $-0.2 \text{ a } -2.7 \text{ mm año}^{-1}$, respectivamente. Mientras que otoño (septiembre-noviembre) registra un incremento de $+4.32 \pm 1.17 \text{ mm año}^{-1}$; en invierno (diciembre-febrero), dos variaciones: un aumento en la parte sur de la cuenca ($1.43 \pm 0.42 \text{ mm año}^{-1}$) y un descenso en el norte ($-1.15 \pm 0.49 \text{ mm año}^{-1}$). Este comportamiento se puede relacionar con lo que se detectó en este trabajo: los escorrentimientos aumentan en otoño y disminuyen en invierno y primavera.

También se coincidió con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2010) respecto al comportamiento histórico de las lluvias del estado de Hidalgo (periodo 1961-1990): su decremento en invierno (54-75 mm) y aumento en verano (540-616 mm), con temperaturas medias de $14.45 \pm 21.25^\circ\text{C}$.

Díaz-Padilla *et al.* (2011) determinaron, mediante el uso de series históricas de precipitación del periodo 1961-2003, que la sequía en México aumenta a partir del año 1990, en tanto que los períodos de humedad disminuyen a partir de esa década. Asimismo, detectaron sequía extrema en la estación Pánuco Veracruz en el año 1995, lo que coincide con las disminuciones detectadas en el CL10 de este análisis, sobre la media de los escurrimientos.

Se observa la correspondencia entre el comportamiento de los escurrimientos de los PS y PH de la cuenca de Metztitlán con los fenómenos meteorológicos, y, aunque no se detectaron cambios para el año 1999 (cuando ocurrió una crecida en octubre), esto coincide con el aumento de escurrimiento para el PH. Lo anterior indica que existe consistencia entre los resultados encontrados en esta investigación y los reportados para la región (mediante el análisis de series históricas) por otros investigadores.

Con respecto a las proyecciones de un futuro cercano, el IMTA (2010) analizó el escenario A₂ (altas emisiones de GEI) de CC para el estado de Hidalgo y estimó disminuciones de precipitación en invierno (de -10 a -15% para el periodo 2010-2039, y de -20 a -25% para 2040-2089) y en verano (-5 a -10% para 2010-2098), con incrementos de temperatura de 2.74 y 3.47 °C en cada estación. Esto coincide con las disminuciones de los escurrimientos en el PS reportados en esta investigación, pero difiere con los incrementos detectados para el PH.

Las predicciones indican el aumento de temperatura y la disminución de lluvias para los próximos 100 años, y mayor susceptibilidad de las regiones áridas y semiáridas de México debido a cambios de incremento en el régimen de lluvia (IMTA, 2010; Méndez *et al.*, 2008): los escurrimientos superficiales disminuirán en 10 a 30% debido a las altas tasas de evaporación que se presentarán en las regiones secas

de latitudes medias. Al comparar estos datos con la tendencia de los escurrimientos de la cuenca de Metztitlán, se considera que, en caso de que ésta se conserve, se aproximará en invierno a las estimaciones del IMTA, pero serán opuestas para el verano.

Las estimaciones en escenarios del CC para los años 2020 y 2050 de precipitación en la RBBM sugieren un descenso en los valores de la lluvia media, en los que particularmente septiembre registrará la mayor merma (27.3 y 40.6%, respectivamente) (Gómez-Díaz *et al.*, 2007). Esto contrasta con los resultados generados en esta investigación, en los que septiembre presentó los escurrimientos máximos del REMM.

A pesar de estas conjeturas, ninguno de los modelos de circulación atmosférica global o regional es capaz de generar escenarios fiables sobre los cambios esperables en vínculo con los eventos extremos, ya que estas suposiciones parten de la base de que el CC alterará todo el volumen de la lluvia mensual en la misma cantidad, sin considerar la concentración de lluvia en períodos temporales cortos (Benito, 2006).

Por su parte, Hurrel (1995) menciona que los cambios locales en las tendencias de lluvia se pueden atribuir a alteraciones en la circulación atmosférica y a modificaciones de los forzamientos radiativos. En este sentido, Barradas *et al.* (2004) realizaron mediciones de balance de energía para determinar la redistribución de dos tipos de comunidades vegetales y sus efectos sobre el flujo de calor sensible en la zona, y concluyeron que existe la posibilidad de que haya CC principalmente en la época seca. Buendía (2012) ratifica que las variaciones del clima en México de las últimas tres décadas obedecen a incrementos de la energía solar, que llegó a la cúspide de la atmósfera, y a variaciones de la energía interna de del fenómeno El Niño – y que por ningún concepto se asocian al CC por efecto invernadero.

Tabla 2. Relación entre los cambios detectados en el régimen de los escurrimientos medios mensuales (1937-2008) de la cuenca Metztitlán (Hidalgo, México) y el fenómeno de El Niño.

Año*	Régimen de detección o tipo de corte	Escurrimiento (REMA) o cambio sobre la media (REMM)	Periodo de cambio	Eventos de El Niño	Intensidad IOS
1939	REMA	Mínimo		1939-1941 ¹	Fuerte
1946	REMA	Mínimo		1946 ¹	Moderado
1951	CL5, CL10	Incremento	Húmedo	1951 ¹	Moderado
1973	CL5	Incremento	Húmedo	1972-1973 ¹	Fuerte
1977	CL5	Disminución	Húmedo	1976-1978 ¹	Moderado
1986	CL10	Disminución	Seco	1986-1987 ¹	Moderado
	REMA	Mínimo		1986-1987 ¹	Moderado
1987	CL5	Disminución	Seco	1986-1987 ¹	Moderado
	REMA	Mínimo		1986-1987 ¹	Moderado
1992	CL5	Incremento	Seco	1991-1992 ¹	Fuerte
1994	REMA	Mínimo		1994 ¹	Moderado
1995	CL10	Disminución	Seco	1992-1995 ²	Fuerte
1997	REMA	Mínimo		1997-1998 ¹	Muy fuerte
1998	REMA	Máximo		1997-1998 ¹	Muy fuerte
2007	CL10	Incremento	Seco y húmedo	SD	

REMA = régimen de los escurrimientos medio anuales de la serie 1937-2008; REMM = régimen de los escurrimientos medio mensuales en la misma serie;

* = año en el que se detectó un cambio en el REMM o mostró escurrimientos extremos en el REMA; CL10 y CL5, cortes de longitud de 10 y 5 años; IOS = índice de oscilación del sur; SD = sin datos; ¹ = Bocanegra *et al.* (2000); ² = Buendía (2012).

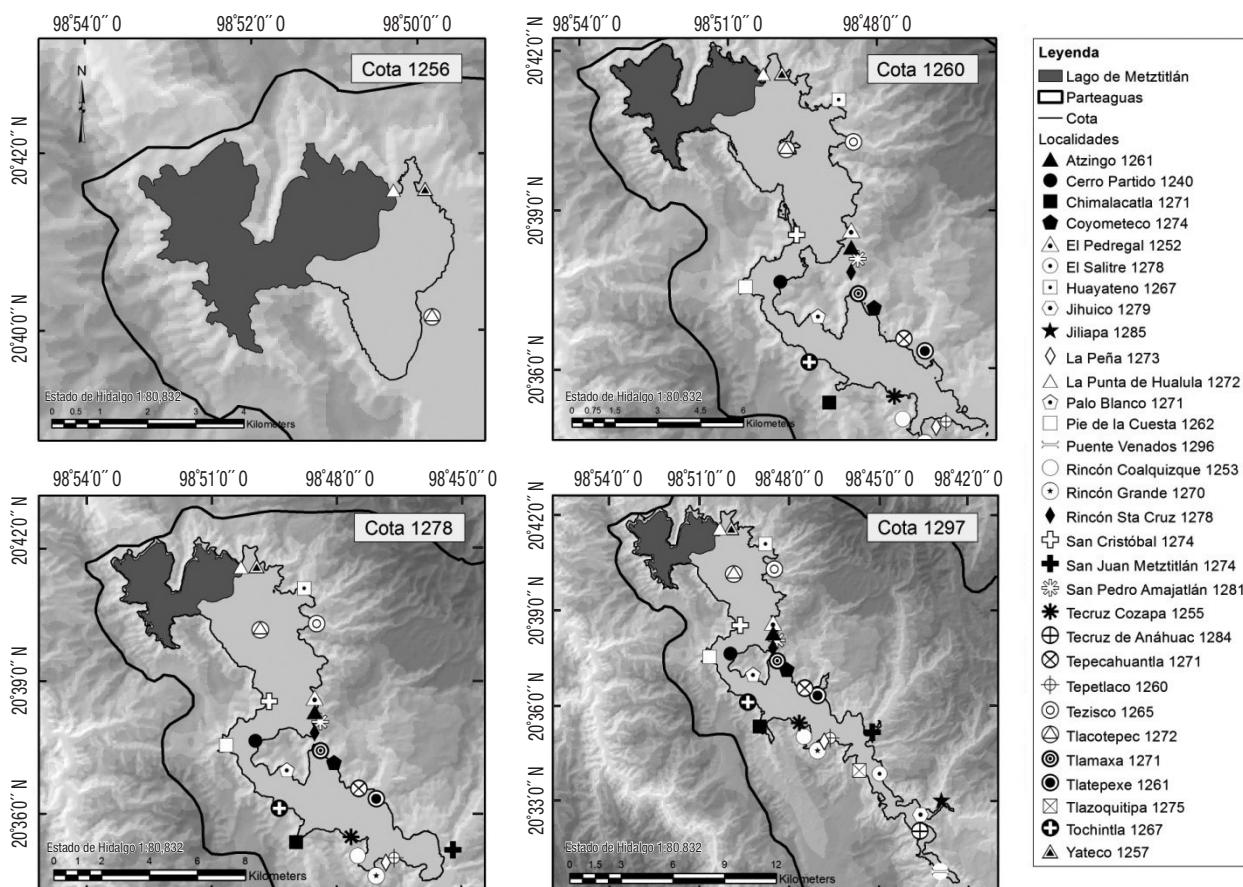


Figura 8. Localidades en el área inundable en la cuenca del río Metztitlán, en Hidalgo, México.

Después de analizar los cambios sobre la media de los escurrimientos de la cuenca Metztitlán de la serie 1937-2008, se considera que los resultados obtenidos no permiten detectar señales que vinculen las variaciones encontradas con el CC, pero sí permiten establecer una correspondencia con la variabilidad interanual de las precipitaciones asociadas con el ENSO, que ha sido causante de sequías extremas y lluvias extraordinarias en diferentes regiones geográficas del planeta.

Kundzewicz y Mata (2004) reportan que en diversas regiones hay tendencias aparentes de incrementos y disminuciones en los caudales de los ríos, que pueden ser resultado del CC o de otros factores, como la variabilidad hidrológica a lo largo del tiempo. En la cuenca Metztitlán, estas precisiones son difíciles de establecer debido al corto periodo de los registros disponibles y a que se carece de mayor información para valorar las condiciones actuales con respecto a los cambios del pasado reciente.

De acuerdo con García (2004), por la ubicación geográfica de la cuenca Metztitlán, la lluvia se registra esencialmente en verano y parte del otoño: la entrada de humedad hacia la región por el lado del Pacífico es factible y relaciona la mayor frecuencia de los ciclones tropicales que se originan en el océano Pacífico con el aumento de lluvia de septiembre. En este contexto, se observó que la distribución de los escurrimientos superficiales totales anuales de la cuenca corresponden a 14.33% para el PS y 85.67% para el PH; sobresale septiembre,

por contener 21% de los escurrimientos con respecto al total anual y 24.5% con respecto al PH.

Adicionalmente, existen factores humanos que pueden contribuir sustancialmente al cambio de las características climáticas en la región. Así lo señalan los estudios de Valdez-Lazalde *et al.* (2011), ya que la deforestación anual en la cuenca (0.5%) permitió el establecimiento de terrenos agrícolas, el cambio de la cobertura vegetal en áreas forestales y el crecimiento urbano a razón de 250.8% en el periodo 1985-2007. Éste desplazó al bosque en Zacualtipán, al matorral en Atotonilco el Grande, y a la agricultura de riego y de temporal en Tulancingo.

La CONANP (CRM-CONANP, 2003) reconoce que el aumento poblacional en los municipios (principalmente Metztitlán), las obras civiles, el aprovechamiento de los recursos geológicos, la tala y la erosión hídrica inducen a la pérdida de suelo antropogénica en la RBBM, lo que afecta a 3.78, 3.42, 0.5 y 3.85% de su superficie, respectivamente. Se considera que todo lo anterior, aunado a los cambios de uso de suelo que se generan en la cuenca, favorece que las precipitaciones extremas eleven la magnitud de las inundaciones y de sus efectos.

Es decir, las altas precipitaciones que se registran en verano en las zonas boscosas y las modificaciones en los coeficientes de escurrimiento vía deforestación-crecimiento urbano propician que la fértil vega del río Metztitlán presente frecuentes e intensas inundaciones,

las que afectan las cosechas agrícolas y la biodiversidad de la RBBM, e incluso ponen en riesgo la vida de los pobladores.

Esto también tiene implicaciones en el ciclo hidrológico, en la conservación del suelo y en el clima local: si se conserva el superávit de lluvia por varios años, éste podría desempeñar un papel trascendental en la redistribución geográfica de las especies vegetales de los ecosistemas, así como en la disponibilidad del agua para la agricultura y el abastecimiento potable. De acuerdo con Whitfield *et al.* (2002), los cambios físicos más importantes que se proyectan tienen modificaciones en la temporalidad de los caudales y en el volumen de agua de los ríos.

Inundaciones en la cuenca de Metztitlán. Con base en datos del INEGI (2015), la carta topográfica F14D61 (INEGI, 2000), las imágenes provistas por Google Earth (2016) y los datos tomados en campo, se determinó que los poblados que principalmente resultan afectados cuando se presentan las inundaciones son Tlacotepec, el cual, aunque está a una altitud de 1 272 m, se encuentra en las inmediaciones del área inundable, por lo que queda aislado cuando se presentan dichos eventos; Tlatepexe, cuya parte más baja coincide con la cota 1 260; El Pedregal de Zaragoza, San Cristóbal y Tecruz de Cozapa, que se extienden por debajo de la cota 1 260. En la figura 8 se pueden observar, de acuerdo con la cota, otras localidades que también son susceptibles de resultar afectadas por el desbordamiento del lago de Metztitlán. Cabe mencionar que la cota que se reporta con el poblado corresponde a su altitud media, por lo que las localidades se pueden desarrollar por debajo de dicho nivel.

Por su parte, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CRM-CONANP, 2003) consideró más poblados y definió su respectivo grado de riesgo de inundación: moderado a normal en época de lluvias, Tlacotepec y camino Tlacotepec-Punta Hualula; moderado a alto con desborde del río Venados, Amajatlán, camino San Cristóbal-Tlacotepec, Macuila, Pedregal de Zaragoza, San Cristóbal y Tlacotepec; extraordinario con desborde del río Venados (por huracán o tormenta tropical intensa), Acalome, Amajatlán, Apanco de la Joya, Atzolcintla, Coaten, caminos San Cristóbal-Amajatlán y San Cristóbal-Atzolcintla, Coyomepec, El Carrizal, El Salitre, Jilotla, Macuila, Pedregal de Zaragoza, La Rivera de Metztitlán, San Cristóbal, Tlacotepec, Tlamaxa, Tlatepexe y Tres Cruces; moderado a alto (tormenta tropical o huracán), camino Xoxoteco-San Agustín, El Terrero, Ocuilcalco, San Agustín Metzquititlán y Xoxoteco. En conjunto, el área inundable equivale a 10% de la superficie de la RBBM.

De acuerdo con Díaz y Vega (2001), es recomendable disponer de un mapa de la planicie de riesgo que delimita las zonas inundables por avenidas de cierto periodo de retorno, a fin de prevenir o mitigar los impactos ocasionados por el desbordamiento; esto, además, permitiría sentar las bases para el futuro desarrollo de las comunidades, el uso de la tierra y otras regulaciones.

Caudales ambientales y probables volúmenes de desfogue del tercer túnel. Los CMM-RO estimados indicaron las mayores reservas para septiembre (23.7 Mm³) y octubre (19.5 Mm³), cubriendo áreas de 772.9 (cota 1 243.47 m) y 650 ha (cota 1 242.9 m), respectivamente. En contraparte, los caudales menores serían para febrero (2.9 Mm³) y marzo (2.3 Mm³), ocupando áreas de 290.6 ha (cota 1 239.2 m) y 278.1 ha (cota 1 239 m). Esto señala que los caudales estarían por debajo de la

capacidad normal del lago que considera la CONAGUA (de 52 Mm³, 1 237.54 ha y una cota 1 246.2 m).

Los volúmenes de desfogue se presentarían durante todo el año y serían de \pm 70 Mm³, salvo en octubre, que sería de 44.7 Mm³. Al desfogar los volúmenes excedentes se reducirá el riesgo de inundaciones en la cuenca de Metztitlán, pero sólo disminuirá el tiempo de permanencia del desbordamiento y no la ocurrencia de las avenidas extraordinarias. Esto significa que las operaciones del tercer túnel sólo contribuirán a minimizar los efectos de las inundaciones. Como existe erosión en las partes altas de la cuenca, es necesario implementar obras para conservar el suelo: agricultura en terrazas en suelos con pendiente superior a 8%, integrar los esquilmos agrícolas, rotar cultivos, introducir barreras arbóreas perpendiculares a la dirección del viento, reforestar, construir represas y diques, desazolvar y rectificar cauces.

Considerando que la sedimentación del lago es de aproximadamente 20 cm año⁻¹, y ésta se redistribuye hacia el interior del sistema en la época de lluvia (Montero, 2008), se podría pensar en un escenario hipotético en el que, sin prácticas de conservación del suelo hasta el año 2050, se provocaría un descenso en la capacidad de almacenamiento del lago en 7 metros de altura y se incrementarían significativamente los riesgos de inundar aguas arriba.

Adicionalmente, se sugiere establecer, durante las operaciones del túnel, un programa de manejo de los volúmenes de desfogue para evitar desequilibrio en las condiciones hídricas originales de la cuenca, y en el que también se consideren las posibles afectaciones aguas abajo, derivadas de una evacuación repentina y excesiva. Santacruz de León y Aguilar-Robledo (2009) recomiendan revisar los caudales ambientales al menos una vez cada 10 años, cuando un río se somete a nuevas y grandes extracciones de agua para beneficio humano.

De esta forma, se podrán aprovechar los terrenos agrícolas cercanos al lago y beneficiar a más de 3 000 propietarios del DR-08; se mantendrá la economía del municipio de Metztitlán, que depende de este sector; se contribuirá a la recarga del acuífero que subyace a la vega de Metztitlán (está en categoría geohidrológica de subexplotación: se recargan 8 Mm³ año⁻¹ y se extraen 7.3 Mm³ para uso público –CONAGUA, 1998–), y se conservará la biodiversidad de la RBBM.

Se concluye que el análisis hidrológico de largo plazo de la cuenca de Metztitlán (periodo 1938-2008) permitió evidenciar en el REMA lluvias extremas máximas en los años 1944, 1955, 1998 y 1999, y mínimas en 1950 y 1997. En el REEM, se observaron siete y cinco cambios en los cortes de longitud de 10 y 5 años, respectivamente. Dichos cambios implican una tendencia a la baja de los escorrentimientos en el periodo seco, y al incremento en el periodo húmedo de años recientes. No se detectaron señales que permitan vincular estos cambios con el CC, pero sí se encontró cierta relación con el fenómeno ENSO.

Se determinó que las cotas de mayor riesgo de afectación por las inundaciones se encuentran en el intervalo 1 246-1 258 msnm. Aunque en la actualidad los poblados cercanos al área de desborde se ubican a mayores altitudes, algunos de éstos se extienden por debajo de los 1 260 msnm, por lo que son susceptibles de resultar afectados en caso de eventos extraordinarios, así como el DR-08. La inconveniencia del método Tenant consiste en que el análisis de los escorrentimientos medios tiene un margen de error de 50%, por lo que se pueden sobreestimar los caudales ambientales.

A partir del presente estudio se sugiere que los CMM-RO permitirían desfogar volúmenes excedentes durante todo el año, registrando las menores evacuaciones en octubre.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo brindado al primer autor en sus estudios de posgrado. A la química Rosalba Montelongo Casanova y a los ingenieros Rubén Armendáriz Rubio y Rubén Ramírez Luna, de la Comisión Nacional del Agua del estado de Hidalgo, quienes proporcionaron información para realizar este trabajo. A la Dra. Bertha Patricia Zamora Morales, por las observaciones al documento. A los revisores anónimos, por su valiosa intervención, ya que contribuyeron significativamente al enriquecimiento del reporte del estudio.

REFERENCIAS

- ACREMAN, M. & M. J. DUNBAR. 2004. Defining environmental river flow requirements? A review. *Hydrology and Earth System Sciences* 8 (5): 861-876.
- BARRADAS, V. L., J. CERVANTES & C. PUCHET. 2004. Evidencia de un cambio climático en la región de las grandes montañas del estado de Veracruz, México. In: García-Codrón, J. C., C. L. Diego, P. Fernández de Arroyabe, C. P. Garmendia & D. Á. Rasilla. (Eds). *El clima entre el mar y la montaña. Serie A, núm. 4*, Santander, España: Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria. pp. 213-219.
- BENITO, G. & V. R. THORNDYCKRAFT. 2005. Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences. *Journal of Hydrology* 313 (1-2): 3-15. DOI:10.1016/j.jhydrol.2005.02.002
- BENITO, G. 2006. Riesgos de inundaciones: tendencias históricas y perspectivas de acuerdo con el cambio climático. *Revista C. & G* 20 (3-4): 29-44.
- BERING CLIMATE. 2006. Regime Shift Detection. Disponible en: <http://www.beringclimate.noaa.gov/regimes/> (consultado: 10 de febrero de 2016)
- BOCANEGRA, J. E. M., J. EDGAR & J. D. P. CAICEDO. 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana* 2: 7-21.
- BUENDÍA, C. E. J. 2012. Sobre las variaciones climáticas en México. *Ingiería de Recursos Naturales y del Ambiente* 11: 117-127.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 1998. *Programa Estatal Hidráulico 1996-2020 (Cuadros Básicos)*. Hidalgo, México. 198 p.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2003. *Análisis integral del río Amajac para definir la problemática que podría presentar aguas debajo de la confluencia con el río Almolón, una vez construido el túnel en la Vega de Metztitlán, establecer las características de funcionalidad del río Amajac después de la confluencia del río Almolón para evitar daños en los terrenos agrícolas y unidad de riego ubicadas en las Vegas, Estado de Hidalgo*. México, D.F. [CD-ROM].
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2008. *Plan de Riegos 2008-2009 del Distrito de Riego 008 Metztitlán, Hidalgo*, México.
- CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 2015. *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año agrícola 2013-2014*. SEMARNAT-CONAGUA. México, D.F. 408 p.
- CONANP (COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS). 2003. *Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, México*. México, D.F. 202 p.
- CRED (CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS). 2009. The international disaster database. Emergency Events Database. Disponible en: www.wmdat.be (consultado el 18 de marzo de 2009).
- CRM-CONANP (CONSEJO DE RECURSOS MINERALES-COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS). 2003. *Riesgo de erosión, deslizamiento e inundación en la Reserva de la Biosfera, Barranca de Metztitlán, Estado de Hidalgo*, México. Estado de Hidalgo, México. 110 p.
- DÍAZ, D. C. & G. VEGA I. 2001. Análisis de gran visión de las inundaciones en la cuenca alta del río Lerma: caso de la subcuenca del río Tejalpa, Estado de México, México. *Ingiería Hidráulica en México* XVI: 73-86.
- DÍAZ-PADILLA, G., I. SÁNCHEZ-COHEN, R. QUIROZ, J. GARATUZA-PAYAN, C. WATTS-THORP, I. R. CRUZ-MEDINA & R. A. GUAJARGO-PANES. 2011. Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos. *Tecnología y Ciencias del Agua* II (4): 51-64.
- GARCÍA DE M., E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, México. Quinta edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 98 p.
- GARCÍA-GONZÁLEZ, M. L., Y. CARVAJAL-ESCOBAR & H. JIMÉNEZ-ESCOBAR. 2007. La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingiería y Competitividad* 9 (1): 19-29.
- GARNICA, P. R. J. & I. ALCÁNTARA, A. 2004. Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz. *Investigaciones Geográficas*. Universidad Nacional Autónoma de México. Boletín 55: 23-45.
- GÓMEZ-DÍAZ, J. D., A. I. MONTERROSO-RIVAS, J. A. TINOCO-RUEDA & J. LÓPEZ-GARCÍA. 2007. Comportamiento de la vegetación bajo escenarios de cambio climático en la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Zonas Áridas* 11 (1): 61-69. DOI:10.21704/za.v1i1.204
- GUHA-SAPIR, D., PH. HOYOIS & R. BELOW. 2015. *Annual Disaster Statistical Review 2014. The numbers and trends*. Centre for Research of the Epidemiology of Disasters (CRED), Université Catholique de Louvain, Melin, Belgium. 54 p.
- HURRELL, J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation. *Science* 296: 676-679.
- IMTA (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA). 2010. *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México* Vol. III, 162 p.

- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). 2000. Carta topográfica de Metztitlán, Hidalgo. F14D61. Esc.1:50 000. México.
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). 2015. Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/catalogoclaves.aspx> (consultado el 20 de marzo de 2017).
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). 2013. Fifth Assessment Report, WG1 AR5. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (consultado el 10 de febrero de 2017).
- KUNDZEWICZ, Z. W. & L. J. MATA. 2004. *Concept paper on cross-cutting theme: water*. Progress of Working Group II towards the IPCC Fourth Assessment Report (Ar4).
- LÓPEZ-HERRERA, M., L. ROMERO-BAUTISTA, N. AYALA-SÁNCHEZ, I. SORIA-MERCADO & A. PORTILLO-LÓPEZ. 2015. Problemática de contaminación en la zona agrícola de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Estudios en Biodiversidad* 1:142-200.
- MAGAÑA, R. V. O. & C. GAY G. 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta Ecológica UNAM* (65): 7-23.
- MÉNDEZ, G. J., J. J. NÁVAR C. & V. GONZÁLEZ O. 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, Universidad Nacional Autónoma de México. Boletín 65: 38-55.
- MENDOZA, V. M., E. E VILLANUEVA & J. ADEM. 1977. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research* 9: 139-145.
- MONTERO, A. S. 2008. Caracterización integral de lagunas del Estado de Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias, Montecillo, Colegio de Post-graduados, Estado de México, México. 144 p.
- PONVERT-DELISLES, D. R., A. LAU & C. BALAMASEDA. 2007. La vulnerabilidad del sector agrícola frente a los desastres: Reflexiones generales. *Zonas Áridas* 11 (1): 174-194. DOI:10.21704/za.v11i1.214
- QUINTERO-ÁNGEL, M., Y. CARVAJAL-ESCOBAR & P. ALDUNCE. 2012. Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo. *Luna Azul* 34: 257-271.
- RAMÍREZ, M., & CUEVAS C. M. 2014. Historia ambiental de una región de México: la Laguna de Metztitlán y sus alrededores, 1872-1949. *Revista Historia 2.0. Conocimiento histórico en clave digital* 4 (7): 37-60.
- RAMSAR (RAMSAR SITES INFORMATION SERVICE). 2007. Ficha informativa de los Humedales de RAMSAR. Disponible en línea en: www.ramsar.org/sitelist.doc (consultado el 2 de febrero de 2017).
- RODIONOV, S. & J. E. OVERLAND. 2005. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *Journal of Marine Science* 62: 328-332.
- RODIONOV, S. N. 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters* 31 (9): 2-5. DOI:10.1016/j.icesjms.2005.01.013
- SANTACRUZ DE LEÓN, G. & M. AGUILAR-ROBLEDO. 2009. Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica* 19 (1): 25-32.
- SANTIAGO, L. J. A., M. LÓPEZ C. & S. LÓPEZ M. 2008. Tendencias del cambio climático global y los eventos extremos asociados. *Ra Ximhai* 4 (3): 625-632.
- SECRETARÍA DE ECONOMÍA. 2012. NMX-AA-159-SCFI-2012. Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. *Diario Oficial de la Federación*, México. pp. 1-118.
- SOLOMON, S., D. OIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR & H. L. MILLER (Eds.). 2007. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*. IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom & New York, USA. 996 p.
- SPP (SECRETARÍA DE PROGRAMACIÓN Y PRESUPUESTO). 1992. Síntesis geográfica del estado de Hidalgo, SPP, INEGI, Aguascalientes, México.
- SUTER, M. 2004. A neotectonic-geomorphologic investigation of the prehistoric rock avalanche damming Laguna de Metztitlán (Hidalgo State, east-central Mexico). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21 (3): 397-411.
- TENNANT, D. L. 1976. In-stream Flow Regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Journal Fisheries* 1 (4): 6-10. DOI:10.1577/1548-8446-1-4
- VALDEZ-LAZALDE, J. R., C. A. AGUIRRE-SALADO & G. ÁNGELES-PÉREZ. 2011. Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán (Méjico) usando imágenes de satélite: 1985-2007. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 17 (3): 313-324. DOI:10.5154/r.rchscfa.2010.06.041
- WEIBULL, W. 1939. *A statistical theory of the strength of materials*. Royal Swedish Institute, Stockholm 151: 45 p.
- WHITFIELD, P. H., C. J. REYNOLDS & A. J. CANNON. 2002. Modelling stream flow in present and future climates: Examples from de Georgia Basin, British Columbia. *Canadian Water Resources Journal* 27: 427-456. DOI:10.4296/cwrij2704427
- WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION). 2009. Tercera conferencia mundial sobre clima (CMC-3). Disponible en: http://www.wmo.int/wcc3/documents/WCC-3_Statement_07-09-09_mods.pdf (consultado el 12 de septiembre de 2014).
- ZHANG, L. & P. SINGH V. 2005. Frequency analysis of flood damage. *Journal Hydrologic Engineering* 10: 100-109. DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:2(100)