

## Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas

### *Evaluation and trends of the hydrological ecosystem services of the Zanatenco river basin, Chiapas*

José Luis L. Arellano Monterrosas\* y Laura Elena Ruiz Meza\*\*

Recibido: 04/05/2017. Aprobado: 04/12/2017. Publicado en línea: 21/02/2018.

**Resumen.** Se analizan las tendencias interanuales de los Servicios Ecosistémicos Hidrológicos (SEH) para el periodo 1961-2009 en la cuenca del río Zanatenco, ubicada en la Costa de Chiapas. Se evaluaron los SEH de regulación de flujos de agua y de control de erosión hídrica, así como de provisión de agua. Para evaluar la regulación de flujos de agua se analizó la variabilidad interanual del balance hidrológico y del coeficiente de escurrimiento. La evaluación del SEH de regulación para el control de erosión hídrica se efectuó mediante el estudio de la dinámica de uso del suelo y vegetación en la cuenca y su efecto en la erosión hídrica. Para la evaluación del SEH de provisión se estimó la disponibilidad del agua superficial y subterránea. Se estudió también la relación entre la oferta y la demanda de agua superficial y subterránea en la cuenca. La variabilidad interanual del escurrimiento superficial es decreciente a una tasa anual de 2.365 millones de m<sup>3</sup>. Ante el abatimiento significativo del escurrimiento, el estiaje extremo y su tendencia interanual decreciente, los periodos de sequía son cada vez más frecuentes e intensos. La erosión hídrica potencial extrema se presenta en terrenos escarpados y representan el 72% del área de la cuenca, mientras que la erosión hídrica actual extrema para el periodo de estudio representa en promedio el 30% de área de la cuenca. Las áreas con cobertura vegetal proporcionan un SEH de protección para el control de la erosión hídrica en la cuenca. Actualmente se presenta un desequilibrio hídrico en la cuenca.

**Palabras clave:** servicios ecosistémicos hidrológicos, balance hidrológico, coeficiente de escurrimiento, erosión hídrica, oferta y demanda de agua, Costa de Chiapas.

**Abstract.** This study analyzes interannual trends in Hydrological Ecosystem Services (HES) in the Zanatenco river basin, located in the Hydrological Region 023 Coast of Chiapas, for the period 1961-2013. We have evaluated the regulating HES related to water flows, control of hydric erosion, as well as the provisioning HES related to water.

We analyzed the interannual variability in hydrological balance (precipitation-evaporation) and runoff index (runoff/precipitation). For the evaluation of regulating HES related to erosion control, land-use and vegetation dynamics in the basin were analyzed for the years 1985, 1993, 2002, 2007, and 2011, as well as their effect on erosion. Finally, the provisioning HES were assessed through the relationship between water supply and demand, considering both surface water and groundwater, for the various water uses in the basin.

Decreasing trends were observed in the interannual variability of precipitation, runoff and the runoff index. These trends reveal a higher deficit of moisture in soil, which defines the marked seasonal regime of the Zanatenco river. Extreme Potential Hydric Erosion (PHE) occurs in rough terrain, which covers 72% of the basin; on the other hand,

\* Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Frontera Sur. Carrera a Chicoasén, Km. 1.5 Fraccionamiento Los Laguitos. Tuxtla, Chiapas. C.P. 29029. Email: jose.arellanoa@conagua.gob.mx

\*\* Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Instituto de Ciencias Biológicas Libramiento Norte Poniente 1150, Col. Lajas Maciel, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Email (autora de correspondencia): laura.ruiz@unicach.mx

extreme Actual Hydric Erosion (AHE) over the five years of study represents on average 30% of the area of the basin. The areas with vegetation cover, particularly within La Sepultura Biosphere Reserve, provide a protective HES for the control of hydric erosion in the basin. The interannual variability of surface runoff is decreasing at an annual rate of 2,365 million m<sup>3</sup>. In this way, the significant decrease in runoff, the extreme dry season, and its decreasing interannual trend,

altogether result in drought periods that are becoming more frequent and intense in the basin. This hydric imbalance is evident in the water supply deficit currently affecting the inhabitants of the city of Tonalá, Chiapas.

**Key words:** hydrological ecosystem services, hydrological balance, runoff index, hydric erosion, water supply and demand, coast of Chiapas.

## INTRODUCCIÓN

Los Servicios Ecosistémicos (SE) son definidos como aquellos beneficios que la población humana obtiene de los ecosistemas para su bienestar y calidad de vida. Incluyen, entre otros, la producción de oxígeno, la provisión de agua, alimentos, fibras, biodiversidad, la captura de bióxido de carbono, la fertilidad de los suelos y su conservación en los ecosistemas, los polinizadores de plantas útiles para consumo humano, y el amortiguamiento del impacto por lluvias extremas (Daily, 1997; Metzger *et al.*, 2006).

En el estudio sobre La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), se clasifican los SE en cuatro tipos: i) Provisión: de agua, energía y alimentos; ii) Regulación: biogeoquímicos, ciclos de carbono y agua; iii) Valor cultural: estéticos, recreación y espirituales; iv) Soporte: los servicios ecosistémicos que son necesarios para la existencia de todos los otros servicios.

Los SE de provisión son aquellos que las poblaciones obtienen directamente de los ecosistemas, así como de su transformación, tales como el agua, alimentos, madera, leña, medicinas, ornamentos, entre otros. Los SE de regulación son consecuencia de los procesos complejos que mantienen las condiciones del ecosistema, e incluyen la regulación del clima, la disminución de riesgos de inundaciones y sequías, la regulación de la calidad del agua y del aire, la protección de las costas, el control de la erosión y los deslaves, el mantenimiento de la fertilidad del suelo. Por su parte, los servicios culturales son aquellos beneficios no tangibles que se derivan de las interacciones entre los individuos y los ecosistemas mediante experiencias como la recreación, la reflexión y el gozo estético, y que constituyen valores sociales otorgados a los ecosistemas por

estar vinculados a la cosmovisión y las identidades culturales y (Balvanera *et al.*, 2016).

Debido a la complejidad de los ecosistemas, los SE pueden ser considerados desde diferentes perspectivas: ambientales (regulación climática, retención del suelo y, almacenamiento de humedad), económicos (provisión de alimentos, materiales, agua), salud pública (condiciones fisiológicas y psicológicas), paisaje (gratificación estética), recreación y sociocultural (Perevochtchikova y Oggionii, 2014). Asimismo, pueden analizarse desde la perspectiva de cuatro componentes distintos: i) la oferta potencial de los servicios, que depende de las condiciones biofísicas del ecosistema; ii) la entrega o demanda que tienen los usuarios de estos servicios; iii) el bienestar humano que proporcionan dichos servicios, y iv) el valor que la sociedad les otorga (Balvanera *et al.*, 2016).

Los Servicios Ecosistémicos Hidrológicos (SEH) comprenden los de provisión de agua para diferentes usos, de regulación de los flujos de agua y reducción de riesgos por crecientes, de soporte para el mantenimiento funcional de ecosistemas, y culturales para la recreación humana (Bergkamp y Smith, 2006). Para Groot *et al.* (2002), la provisión de agua por los bosques comprende la infiltración, la retención y almacenamiento de agua en el suelo, esteros, lagos y acuíferos. Por otra parte, Balvanera (2012) considera que los SEH proveen también identidad, legado cultural y sentido de pertenencia a los pueblos que comparten la cuenca.

De esta forma, los SEH que proveen las cuencas corresponden a los de regulación de flujos de agua y control de erosión hídrica, así como los de provisión de agua. Los SEH de regulación de flujos de agua se refieren a la regulación de las relaciones lluvia-escurrencimiento, fundamentales en la gestión de riesgos de inundaciones y el control de la erosión hídrica. Por otra parte, los SEH de provisión

corresponden a los de suministro de agua para diferentes usos.

El equilibrio de los ecosistemas se encuentra gravemente alterado por las actividades humanas, en particular por el cambio de uso del suelo, la degradación de cuencas, la destrucción de manglares, la pérdida de la biodiversidad y la contaminación ambiental. El cambio climático generará alteraciones en la composición y funcionamiento de los sistemas naturales, lo que afectaría la provisión de los SE (Oyarzún *et al.*, 2005; SEMARNAT, 2012). Las variaciones en los patrones de precipitación están afectando los SE y por tanto la disponibilidad de los recursos hídricos (Magaña, *et al.*, 2004).

Los cambios en el uso del suelo y la pérdida de ecosistemas y cobertura vegetal reducen la capacidad de una cuenca para proveer los SEH (Porrás *et al.*, 2008). La eliminación de los bosques puede provocar un aumento de los flujos hídricos debido a que se reduce la infiltración (Bruijnzeel, 2004; Andréassian, 2004; Ausseil *et al.*, 2013). Por otra parte, la producción de agua superficial y la recarga de acuíferos son los SEH que sufren mayores impactos por cambios en la cobertura vegetal (Oyarzún *et al.*, 2005; Villón, 2011; Carvalho-Santos *et al.*, 2014).

Actualmente, los SEH que las cuencas de México proveen, están declinando a tasas aceleradas y son fundamentales para un gran número de pobladores, las pesquerías o los servicios asociados a la regulación del impacto de eventos hidrometeorológicos extremos en zonas costeras (Balvanera y Cotler, 2007).

En México, el programa gubernamental de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) surge bajo la hipótesis de que la presencia de bosque o selva contribuye a regular el ciclo hidrológico, incrementando a su vez la recarga de agua subterránea, por lo que el principal criterio de elegibilidad del programa de PSAH es una cobertura forestal mayor o igual al 80%; sin embargo, no se ha investigado detalladamente la relación entre el bosque y la recarga de agua (Peñuela, 2014). El programa otorga una compensación económica o subsidio a los poseedores de los terrenos para preservar sus áreas forestales. Por otra parte, la mayoría de los estudios de evaluación de SEH en México están orientados al impacto del programa de PSAH

en la disminución de la tasa de deforestación, la conservación de la biodiversidad, la calidad del agua o el mejoramiento de los medios de vida de los beneficiados (Cortina-Villar *et al.*, 2012; Alix-García, Shapiro y Sims, 2012; Perevochtchikova, 2012; Perevochtchikova y Oggioni, 2014; Perevochtchikova y Oggioni, 2014; Alix-García y Wolff, 2014), más que a la contribución de la cobertura forestal en los servicios hidrológicos que proporciona. Por otra parte, la evaluación se realiza en los polígonos de los predios, no a nivel de la cuenca hidrológica de influencia.

La relación entre el bosque y la recarga de agua es muy compleja y aún está a debate (Andréassian, 2004). Algunos estudios de caso realizan la evaluación de los SEH con uso de modelos o parámetros hidrológicos a nivel de cuenca (Vigerstol y Juliann, 2011; Martínez y Balvanera, 2012; Ausseil *et al.*, 2013; Carvalho-Santos *et al.*, 2014).

En este marco, el objetivo general del presente trabajo es la evaluación a nivel de cuenca de los SEH de regulación (de flujos de agua y de control de erosión hídrica), como los de provisión de agua que proporciona la cuenca del río Zanatenco, Chiapas, través de parámetros de procesos hidrológicos como el coeficiente de escurrimiento, el balance hídrico y la disponibilidad de agua superficial, la oferta y demanda de agua y su relación con el cambio de uso del suelo a través del estudio de su variación interanual en una región particularmente vulnerable a eventos hidrometeorológicos extremos como las sequías e inundaciones.

## ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Zanatenco se ubica en el extremo noroeste de la Región Hidrológica 023 Costa de Chiapas (SRH, 1969) y forma parte de la Subregión hidrológica Laguna del Mar Muerto (SEMARNAT y CONAGUA, 2007). Geográficamente, se ubica entre las coordenadas 15°59'19'' y 16°09'34'' de latitud Norte y, 93°46'52'' y 93°35'24'' de longitud Oeste (Figura 1). Limita al noreste con su parteaguas en la Sierra Madre de Chiapas, al noroeste con la cuenca del río Tiltepec, al sur con la laguna del Mar Muerto. Desde el parteaguas a

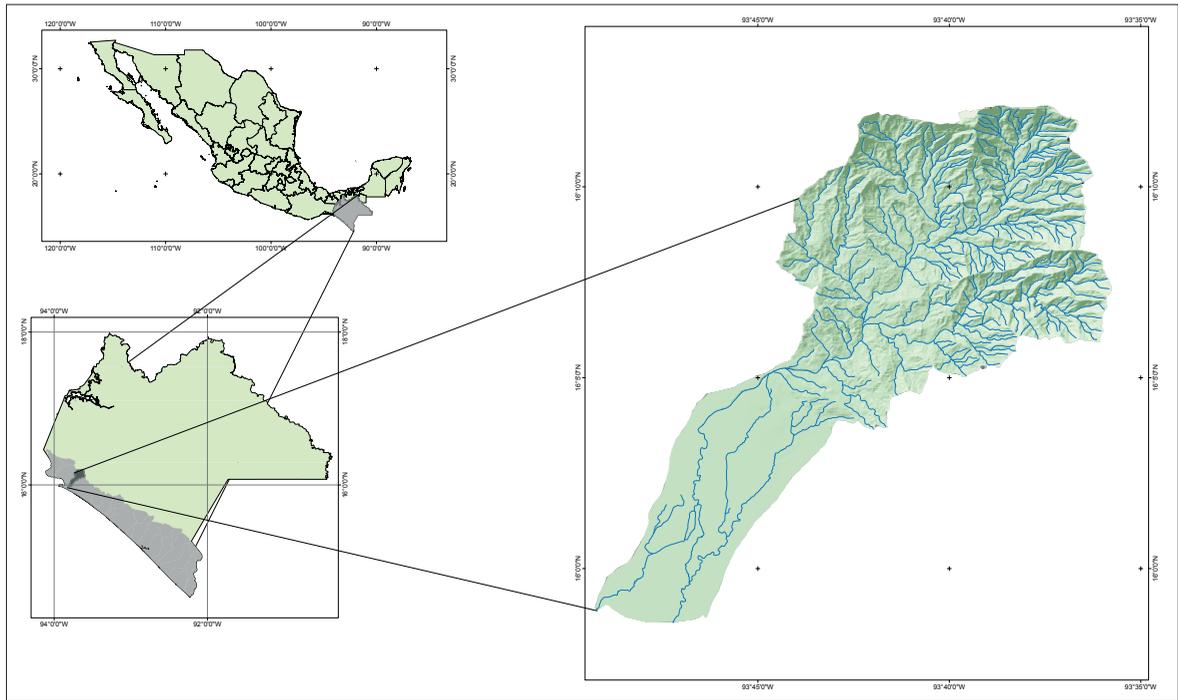


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (elaboración propia).

2481 msnm hasta su desembocadura en la laguna del Mar Muerto la cuenca tiene una superficie total de 231.0552 km<sup>2</sup>. La cuenca se ubica en la región Istmo-Costa, en los municipios de Tonalá y Villaflores. Una parte de la cuenca alta se ubica dentro de la Reserva de la Biósfera de la Sepultura (REBISE).

La cuenca forma parte de la Sierra Madre de Chiapas en un 68.28% de su territorio y de la Llanura Costera del Pacífico en su parte baja en un 31.72%. En la parte alta y media de la cuenca, los suelos dominantes son los Regosoles, suelos derivados de rocas ígneas extrusivas con profundidades mayores de 60 cm con buen drenaje interno. En la cuenca baja dominan los Luvisoles, suelos de origen aluvial, caracterizados por su textura arcillo-arenosa y depósitos arenosos, con profundidades mayores de 200 cm y colores moteados debido a las fluctuaciones del nivel freático (Trujillo, 1998). En la cuenca baja, el tipo de clima corresponde al A(w<sub>2</sub>): cálido subhúmedo, el más húmedo de

los subhúmedos, con temperaturas máximas de 37 °C, temperatura media anual mayor de 34 °C y temperatura del mes más frío mayor de 33 °C (CONAGUA *et al.*, 2012).

La precipitación media anual en la cuenca fue de 1723.8 mm en el periodo 1961 a 2013. La temporada de lluvias comprende de mayo a octubre, con un promedio de 1650.5 mm (96% de la precipitación media anual), y el periodo de secas se presenta de noviembre a abril con un promedio de 73.3 mm (4% de la precipitación media anual); la sequía intraestival es muy marcada durante el mes de julio. La precipitación máxima mensual ocurre en el mes de septiembre con 416.9 mm, y la mínima mensual en diciembre con 1.3 mm. En 2011, la superficie con bosques y selvas representó 46.6% del área de la cuenca, los pastizales alcanzaron 41.1%, la agricultura 12% y 0.3% de asentamientos humanos. En la región Istmo-Costa de Chiapas, como en la cuenca del río Zanatenco, la actividad económica más importante es la ganadería.

## MÉTODOS Y MATERIALES

Para la evaluación de los SEH de la cuenca se usaron los datos disponibles de las estaciones climatológica e hidrométrica, ubicadas en la parte baja de la cuenca del río Zanatenco. La estación climatológica de Tonalá, Chiapas cuenta con datos de 1961 a 2013, y se ubica a 16°05' de latitud norte, 93°42' de longitud oeste y una altitud de 55 m (Serrano *et al.*, 2006; IMTA, 2013). Para la obtención de la información hidrométrica se utilizaron los registros de la estación número 23011 del río Zanatenco, ubicada a 16°04'15" de latitud norte y 93°45'00" de longitud oeste y una altitud de 17 m (SRH, 1969; CONAGUA, 2010). Se seleccionaron estas estaciones debido a que son las únicas ubicadas dentro de la cuenca así como a su representatividad y que disponen del mayor periodo de registro histórico de datos. La información climatológica e hidrométrica de estas estaciones fue complementada con la proporcionada digitalmente por el Centro Hidrometeorológico de CONAGUA, ubicado en Tuxtla Gutierrez, Chiapas, y corresponde a los registros actualizados disponibles.

Se calcularon los parámetros estadísticos descriptivos de las variables climatológicas e hidrométricas de estudio: medias, valores máximos, mínimos, rango, desviación estándar, coeficiente de variación. La variación interanual se analizó mediante regresión lineal y su coeficiente de correlación  $R^2$  (Infante y Zárate, 1984).

### Servicios Ecosistémicos Hidrológicos de regulación de flujos de agua

Para la evaluación de los SEH de regulación de flujos de agua se analizó la dinámica del uso del suelo y la vegetación en la cuenca mediante la utilización de la información cartográfica digital de los planos de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 elaborados por INEGI para los años 1985, 1993, 2002, 2007 y 2011. Se consideraron estos años con base en la disponibilidad de información cartográfica de uso del suelo de la cuenca como el incorporar, dentro de los periodos de estudio, el impacto de las últimas grandes inundaciones de septiembre de 1998, octubre de 2005 y mayo de 2013. Se agruparon las categorías según la guía para

la interpretación de cartografía de uso del suelo y vegetación de INEGI (2015) y se operaron con uso del programa ArcView 3.2.

La modelación precipitación-escorrentía depende principalmente de las características edafológicas y de cobertura vegetal de la cuenca. Asimismo, la relación precipitación-escorrentía es altamente no lineal; es decir, un pequeño cambio en la precipitación se magnifica en el escurrimiento (Martínez, 2007). En este estudio se evaluó el efecto antrópico del cambio de uso del suelo y la cobertura vegetal en los procesos hidrológicos de la cuenca (Juárez *et al.*, 2010; Mendoza *et al.*, 2011; Figueroa *et al.*, 2011; Cano, Andreoli, Arumi y Rivera, 2014).

El SEH de regulación de flujos de agua en cuencas se estima con el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ), el cual expresa las relaciones precipitación-escorrentía (Campos, 2007; Arellano, 2012).

El  $C_e$  representa la respuesta hidrológica de la cuenca, expresa la relación del volumen de escurrimiento respecto al volumen precipitado en la cuenca. Se calcula con la ecuación [1] (Blume, Zehe y Bronstert, 2007; Campos, 2007; 2009; 2014; Arellano, 2012; Kabeya *et al.*, 2014):

$$C_e = E/P \quad [1]$$

Donde  $C_e$  es el Coeficiente de escurrimiento (adimensional),  $E$  es el escurrimiento superficial (mm) en el mismo periodo de tiempo y  $P$  es la precipitación (mm).

### Servicios Ecosistémicos Hidrológicos de regulación para el control de la erosión hídrica

En el caso de la evaluación de los SEH de regulación para el control de erosión hídrica, se estimó la pérdida de suelo por Erosión Hídrica Potencial (EHP) y Erosión Hídrica Actual (EHA) para los usos del suelo y vegetación del periodo de estudio (1985, 1993, 2002, 2007 y 2011).

Se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), desarrollada originalmente por Wischmeier y Smith en 1978, y utilizada ampliamente en estudios de erosión en México (Montes, Uribe y García, 2011; Figueroa *et al.*, 2011; Arellano, 2012; Pérez, Arellano, Ibañez y Fernández,

2012; Castro, 2013). La EUPS fue utilizada por Carvalho-Santos *et al.* (2014) para la evaluación de los SEH de regulación para el control de erosión hídrica en cuencas del norte de Portugal. La EUPS se expresa de la siguiente forma:

$$EHP = R \cdot K \cdot LS \quad [2]$$

$$EHA = EHP \cdot CP \quad [3]$$

Donde EHP es la pérdida de suelo por erosión hídrica potencial (ton/ha/año); R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ/mm/ha/h); K es el factor de erodabilidad del suelo (ton/ha/MJ/mm); LS es el factor topográfico longitud-pendiente (adimensional); CP es el factor de uso del suelo y prácticas de conservación (adimensional). EHA es la pérdida de suelo por erosión hídrica actual (ton/ha/año).

Se utilizó la técnica de álgebra de mapas, generando un plano por cada variable de la EUPS (Arellano, 2012; Pérez *et al.*, 2012). Para la estimación de la EHP en la cuenca de estudio se aplicó la ecuación [2] con la multiplicación de cada una de los factores R, K y, LS. Posteriormente, se aplicó la ecuación [3] para la obtención de la EHA considerando los valores de CP para cada uno de los años de estudio: 1985, 1993, 2002, 2007 y 2011.

Se aplicó la ecuación [4], propuesta por Baumann y Arellano (2003), para la estimación de R en la Sierra Madre de Chiapas:

$$R = 14.523 P - 6601 \quad [4]$$

Donde P es la precipitación media anual (mm). Para la estación climatológica Tonalá, Chiapas se consideró P= 1723.8 mm (la media del periodo 1961-2013).

El factor K se obtuvo de tablas con uso del plano edafológico escala 1:250 000, elaborado por INEGI, según la unidad de suelo dominante y su textura, debido a que no existen estudios de suelos más detallados en la cuenca objeto de este trabajo. La estimación del factor K a esta escala es suficiente para la jerarquización de áreas con diferente grado de erosión hídrica con uso del modelo de EUPS (Arellano, 1994).

El factor LS representa la longitud (L) y la pendiente (S) del terreno, y afecta significativamente la pérdida de suelo por erosión hídrica (Rivera-Toral *et al.*, 2012). El factor LS se estimó con el uso del Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca; se obtuvo el Plano de rangos de Pendientes y se calcularon los valores de LS (Arellano, 2012; Pérez *et al.*, 2012).

El factor CP comprende el uso del suelo (C) y las prácticas de manejo y conservación del suelo (P). Se utilizaron los planos de uso del suelo y vegetación de la cuenca para los años de estudio: 1985, 1993, 2002, 2007 y 2011. Se aplicaron los valores de C propuestos por Arellano (2012). Para los propósitos de este estudio P= 1.0 (no se consideró el efecto de P).

A partir de la estimación de la EHP con la ecuación [2] y para cada uno de los escenarios de usos del suelo y vegetación de los años de estudio, se aplicaron los valores de C para la estimación de la EHA con la ecuación [3]. Los rangos de pérdida de suelo por EHP y EHA se agruparon en seis clases: baja, media, considerable, alta, muy alta y extrema. Se calculó la media armónica o ponderada de la EHA de cada año de estudio.

### Servicios Ecosistémicos Hidrológicos de provisión de agua

La estimación de los SHE de provisión se realizó mediante la aplicación de la ecuación del balance de humedad (Mokondoko *et at.*, 2014), así como de la disponibilidad de agua superficial y subterránea en la cuenca.

En cada año, el balance de humedad en el suelo se estima con la diferencia de la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial o de referencia (EVT). La EVT se estima en función de la evaporación (EV). De esta forma la ecuación de balance hidrológica se expresa de la siguiente forma:

$$Ss = P - EV \quad [5]$$

Si P-EV<0, entonces se presenta un déficit de humedad (D) y se reducirá la humedad almacenada en el suelo. Por el contrario sí P-EV>0, se presenta un exceso de agua (Ex) y humedad excedente se almacena en el suelo. Una vez que se satura el suelo,

el agua excedente escurrirá superficialmente o se infiltrará profundamente (percolación profunda). La percolación profunda puede derivar posteriormente en flujo base o bien eventualmente incorporarse al acuífero dependiendo de sus condiciones geohidrológicas y de las componentes del régimen de agua subterránea (Peñuela, 2014).

Las áreas de la cuenca que captan la mayor cantidad de agua son aquellas donde se concentra una mayor precipitación a lo largo del año y donde la mayor cantidad de la misma se almacena en el suelo (rendimiento hídrico) según las condiciones de clima y tipo de vegetación (De Groot *et al.*, 2002; Oyarzún *et al.*, 2005; Mokondoko *et al.*, s/f).

Con respecto a la estimación de la disponibilidad de agua superficial en la cuenca, se analizó la información disponible en la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2010) registrados en la estación hidrométrica del río Zanatenco. Esta información fue complementada con la proporcionada digitalmente por el Centro Hidrometeorológico de CONAGUA, ubicado en Tuxtla Gutierrez, Chiapas. De esta forma, se analizó toda la información disponible con registros anuales completos. Se utilizó también la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 para la estimación del escurrimiento superficial medio anual (CONAGUA, 2002; Campos, 2009, 2014). La disponibilidad de agua subterránea en la cuenca se estimó a partir del Decreto de disponibilidad del acuífero Arriaga-Pijijiapan (SEMARNAT y CONAGUA, 2007), única fuente disponible debido a que no se cuenta con un estudio geohidrológico regional.

Para el estudio de la demanda de agua se analizó la base de datos 2012 del Registro Público de Derechos de Agua (REPD), debido a que la base de datos de este año entregada por el Organismo de Cuenca Frontera Sur de CONAGUA está completa y geo-referenciada para la cuenca de estudio. En base de datos se obtienen los volúmenes de agua concesionados tanto de aprovechamientos superficiales como subterráneos para los diferentes usos en la cuenca.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Servicios Ecosistémicos Hidrológicos de regulación de flujos de agua

#### *La dinámica del uso del suelo y la vegetación en la cuenca*

Los datos obtenidos revelan que la superficie de bosque mesófilo de montaña se mantiene constante durante el periodo de 1985-2011, representando un 6.8% del territorio de la cuenca principalmente en su parte alta (zona núcleo de la REBISE). En cambio, la superficie con selva mediana subperennifolia disminuyó del 51.4% al 39.8% a lo largo del mismo periodo (Tabla 1 y Figuras 2 y 3). Estas áreas corresponden a las reportadas por Cortina-Villar *et al.*, (2012) como deforestadas de 2003 a 2007 dentro del área de amortiguamiento de la REBISE.

La superficie dedicada a la agricultura de temporal presenta un incremento significativo al pasar del 0.6 % al 12.7% de 1985 a 2007, para mantenerse prácticamente igual hasta 2011, con el 12%.

El proceso de ganaderización de la cuenca se manifiesta con una significativa proporción de la superficie de pastizales, y con el incremento de la superficie de pastizal inducido al pasar de 2134.5 hectáreas en 1985 a 5779.7 hectáreas en 2007. La superficie dedicada a la ganadería es la más significativa en todo el periodo de estudio, representando hasta el 40% de la superficie de la cuenca, en contraste con el 12% dedicado a la agricultura de temporal, según se muestra en la Tabla 1 y la Figura 3. La cuenca del río Zanatenco es un ejemplo típico del acelerado proceso de ganaderización de tipo extensivo que reduce las áreas de selvas, característica de la región Istmo-Costa de Chiapas (Lucero, Medina y Cervantes, 1994). De esta forma, de 1985 a 2011 en la cuenca del río Zanatenco se han transformado 3155 hectáreas de selva mediana a pastizal inducido.

Al estudiar la relación entre la cobertura vegetal y el impacto de las lluvias extremas en cuencas de la Sierra Madre de Chiapas, Conservación Internacional (2012) obtiene que para la cuenca Zanatenco, la disminución de las áreas de bosques de pino-encino y de selvas altas y medianas disminuyen drásticamente los SEH que provee la cuenca

Tabla 1. Usos del suelo en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1985-2011).

Uso del suelo	1985		1993		2002		2007		2011	
	Ha	%								
Agricultura de temporal	141.1	0.6	3467.7	15.0	3791.6	16.4	2937.3	12.7	2777.7	12.0
Asentamientos humanos	71.7	0.3	71.7	0.3	71.7	0.3	71.7	0.3	71.7	0.3
Bosque mesófilo de montaña	1563.3	6.8	1563.3	6.8	1563.3	6.8	1563.3	6.8	1563.3	6.8
Manglar	150.2	0.7	0.7	0.0	0.7	0.0	0.7	0.0	0.7	0.0
Pastizal cultivado	7145.6	31.0	5053.7	21.9	3116.1	13.5	3553.6	15.4	3713.2	16.1
Pastizal inducido	2134.5	9.3	2660.3	11.5	4983.0	21.6	5779.7	25.1	5758.8	25.0
Selva mediana sub-perennifolia	11 860.9	51.4	10 250.1	44.4	9541.2	41.4	9161.2	39.7	9182.1	39.8
Totales	23 067.5	100.0	23 067.5	100.0	23 067.5	100.0	23 067.5	100.0	23 067.5	100.0

Fuente: elaboración propia con base en los planos de vegetación y uso del suelo de INEGI.

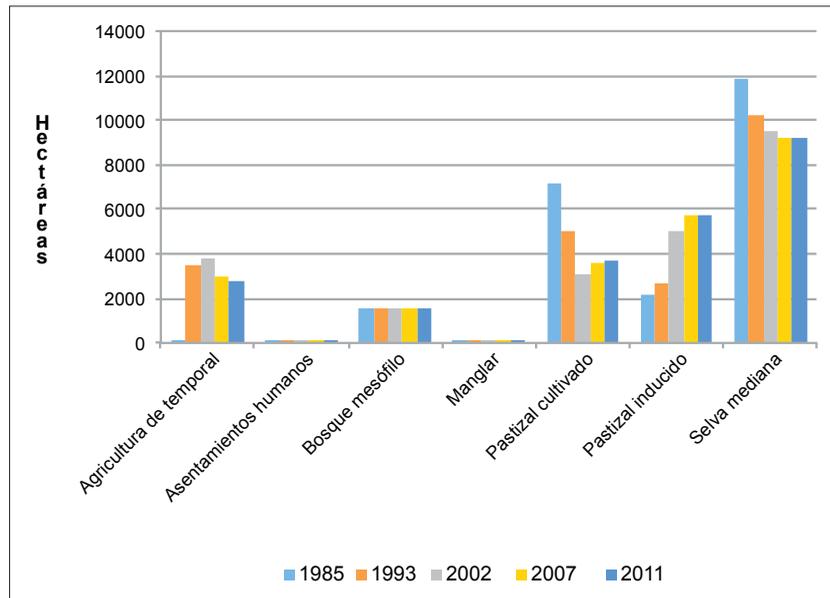


Figura 2. Uso del suelo y vegetación en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1985-2011). Fuente: elaboración propia con base en los planos de vegetación y uso del suelo de INEGI.

(regulación de flujos de agua, control de erosión hídrica y aprovisionamiento de agua).

*Relaciones precipitación-escurrimiento*

Se cuenta con registros completos de precipitación y de escurrimiento anual en la cuenca de estudio

únicamente en el periodo 1961-2009. Como se muestra en la Figura 4, la variabilidad interanual de ambas variables es análoga; es decir, los años con menor precipitación corresponden a los años con menor escurrimiento superficial, y a la inversa. Mediante regresión lineal se obtiene que la varia-

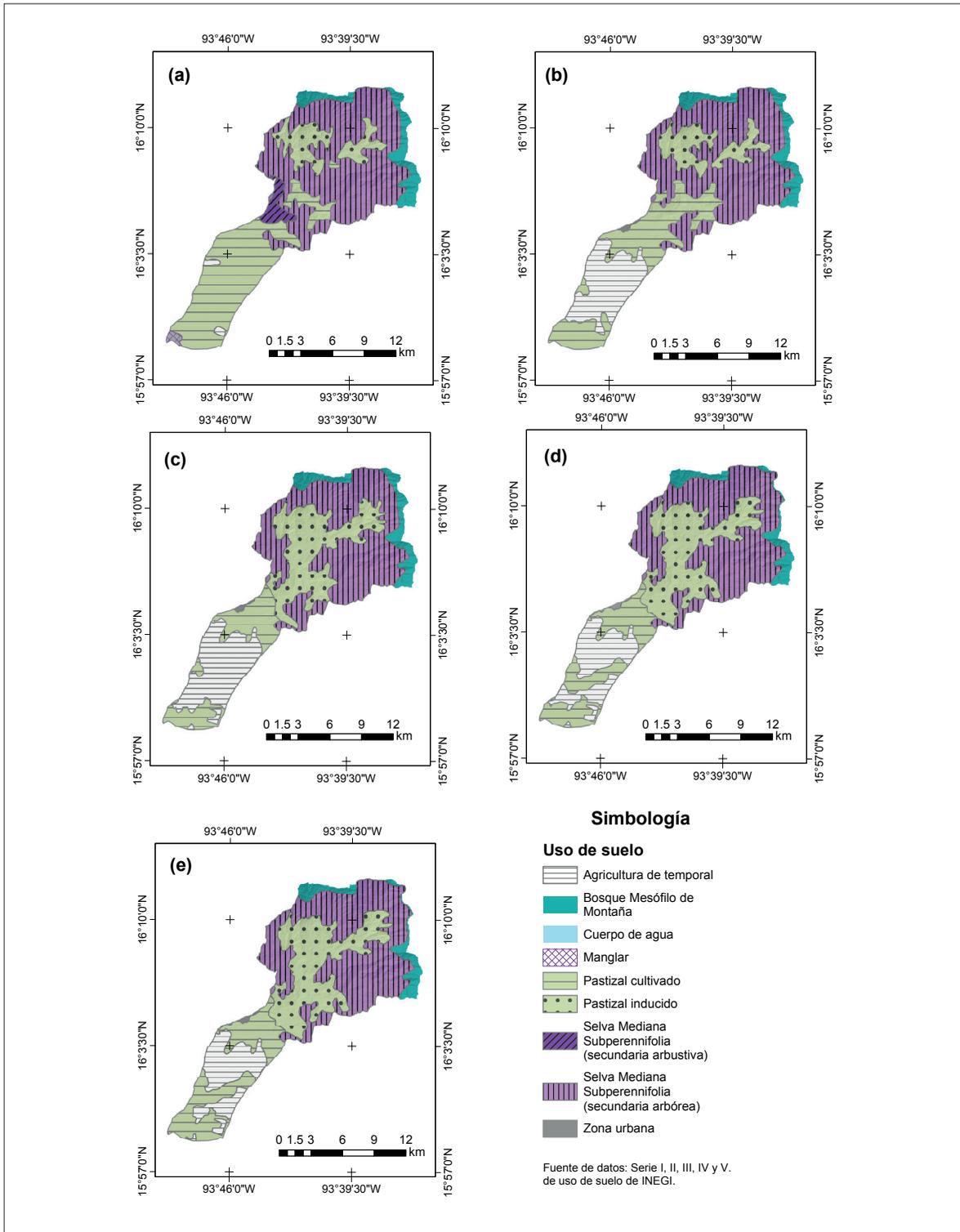


Figura 3. Cambios de uso del suelo y vegetación en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1985-2011).

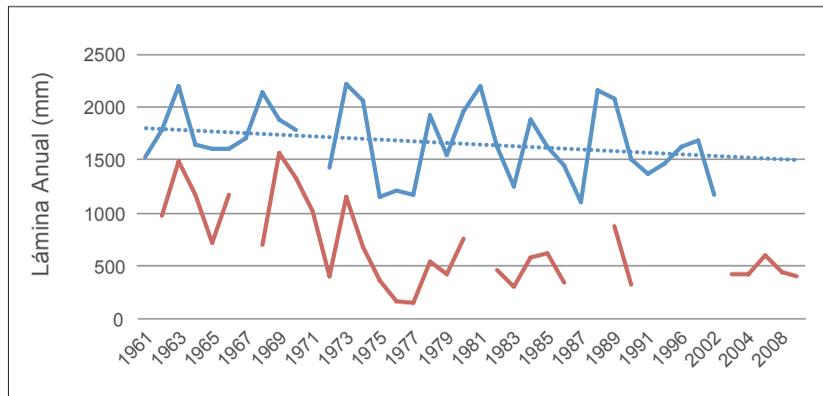


Figura 4. Variabilidad de la precipitación y escurrimiento anual (mm) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1961-2009). Fuente: elaboración propia con base en datos de las estaciones climatológica e hidrométrica.

bilidad interanual de la precipitación muestra una tendencia decreciente a una tasa de  $-6.0 \text{ mm/año}$  con un  $R^2$  de 0.038 (Figura 4).

Con respecto al escurrimiento superficial, para el periodo de 1962-2009, el escurrimiento medio anual del río Zanatenco fue de 628.9 mm; el mínimo de 151.0 mm en el año 1977, y el máximo de 1574.1 mm en 1969. Los máximos volúmenes anuales de escurrimiento se presentaron en 1963, 1969 y 1970. Por su parte, los años con menores volúmenes de escurrimiento fueron 1977, 1983, 1990 (Tabla 2).

Mediante regresión lineal se obtiene que la variabilidad interanual del escurrimiento superficial muestra una tendencia decreciente con una disminución de  $-15.07 \text{ mm/año}$  con un  $R^2$  de 0.2919. Este abatimiento equivale a una menor disponibilidad de agua equivalente a 2.365 millones de  $\text{m}^3$ . Según se observa en las Figuras 2 y 4, los abatimientos en el escurrimiento superficial no solo están asociados a una menor precipitación, también están relacionados con los cambios de uso del suelo en la cuenca, particularmente durante el periodo de 1985-2007 en el que se presentaron

Tabla 2. Coeficiente de escurrimiento y balance de humedad en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1961-2009)

Año	Precipitación anual (mm)	Evaporación anual (mm)	Balace de humedad anual (mm)	Escurrimiento anual (mm)	Coeficiente de escurrimiento (%)
1961	1520.0	1958.7	-438.7		
1962	1772.8	1569.6	203.2	977.4	55.13
1963	2191.1	1911.4	279.7	1490.5	68.02
1964	1646.2	2010.3	-364.1	1172.9	71.25
1965	1598.6	1990.0	-391.4	724.6	45.33
1966	1597.2	2086.7	-489.5	1167.2	73.08
1967	1699.2	2078.6	-379.4		
1968	2131.5	1958.4	173.1	690.1	32.38
1969	1872.9	1613.3	259.6	1574.1	84.05
1970	1781.9	1955.0	-173.1	327.0	74.47
1972	1433.4	1890.0	-456.6	1021.9	
1973	2207.4	1986.8	220.6	407.5	28.43
1974	2062.5	1851.5	211.0	1153.6	52.26
1975	1145.0	1872.3	-727.3	685.8	33.25

Tabla 2. Continúa.

Año	Precipitación anual (mm)	Evaporación anual (mm)	Balance de humedad anual (mm)	Escorrentamiento anual (mm)	Coficiente de escurrimiento (%)
1976	1209.3	2224.6	-1015.3	371.7	32.46
1977	1171.2	216.06	-994.8	157.9	13.06
1978	1920.6	2084.8	-164.2	151.0	12.89
1979	1552.1	1918.4	-366.3	536.6	27.94
1980	1963.1	2219.9	-256.8	429.8	27.69
1981	2193.3	2058.2	135.1	759.4	38.68
1982	1620.3	1990.0	-369.7		
1983	1254.6	1846.0	-591.4	470.8	29.05
1984	1871.9	2119.6	-247.7	311.6	24.84
1985	1617.3	2016.0	-398.7	577.6	30.86
1986	1450.1	2082.9	-632.8	611.5	37.81
1987	1101.3	2384.8	-1283.5	337.7	23.29
1988	2163.2	2283.9	-120.7		
1989	2079.5	2007.1	72.4		
1990	1506.4	2122.5	-616.1	870.1	41.84
1991	1362.6	2259.7	-897.1	332.9	22.10
1992	1471.8	2299.1	-827.3		
1996	1617.2	2150.4	-533.2		
1997	1676.5	2265.8	-589.3		
2002	1168.1	2206.6	-1038.5		
2003					
2004				425.6	
2005				423.7	
2008				605.0	
2009				446.5	

Fuente: elaboración propia con base en datos de la estaciones Climatológica e Hidrométrica.

cambios acelerados en la pérdida de cobertura vegetal, según se mostró anteriormente.

#### *Coficiente de escurrimiento*

Los registros hidrométricos de volumen anual de escurrimiento, expresado en miles de m<sup>3</sup>, se transformaron a lámina de escurrimiento en mm, dividiendo el volumen entre el área de la cuenca hasta la estación de aforo (157 km<sup>2</sup>) según se muestra en la Tabla 2. Así, se obtiene un valor máximo de Ce de 84.05% y mínimo de 12.89%

en los años con el régimen de escurrimiento más húmedo (1969) y más seco (1977), respectivamente. La tendencia interanual del Ce es decreciente con una tasa de -1.54 %/año y un R<sup>2</sup> de 0.4073 (Figura 5).

Para la cuenca del río Huehuetán, ubicada también en la Región Hidrológica 023 Costa de Chiapas, Arellano (2012) reporta también una tendencia interanual decreciente en el Ce con un rango de valores del 98.26% (1968) al 47.21% (1988) y una tasa de -1.12 %/año. Esta tendencia se

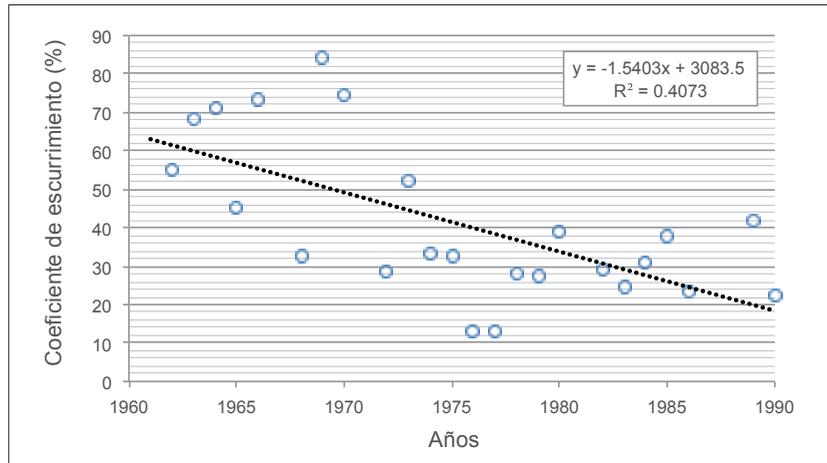


Figura 5. Variabilidad del Coeficiente de escurrimiento (%) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1962-1990). Fuente: elaboración propia con base en datos de la estaciones climatológica e hidrométrica.

relaciona con el SEH que proporciona la cobertura vegetal de bosques, selvas y café con sombra de la cuenca que representa un 82% de su área.

De esta forma, con menores láminas de precipitación y el gran déficit de humedad registrado en los últimos años en la cuenca del río Zanatenco, la mayor parte del agua de lluvia se infiltra en el suelo y no alcanza a escurrir debido a las condiciones de humedad antecedente del suelo y cobertura vegetal. Sin embargo, debido a que las láminas de precipitación de los años secos son tan pequeñas, el agua infiltrada no alcanza a percolarse profundamente como para incorporarse al acuífero o bien descargar en la temporada de secas como flujo base, mismo que permitiera mantener el flujo del río durante la temporada de secas. En la temporada de secas en la Costa de Chiapas, mientras que en el río Huehuetán todos los años fluye agua, el río Zanatenco frecuentemente se seca.

### Servicios Ecosistémicos Hidrológicos de regulación para el control de la erosión hídrica

En los Planes de Manejo de las cuencas de los ríos Zanatenco y Tiltepec (CONAGUA *et al.*, 2009; 2012), así como en los diagnósticos realizados con la aplicación de la metodología de las Tarjetas de Evaluación en las cuencas de los ríos Zanatenco y Lagartero (CONAGUA, *et al.*, 2010a; 2010b), diagnósticos y estudios regionales (De la Fuente, Lisle y McKean, 2010) así como de las cuencas de los ríos Zanatenco, Lagartero y Coapa (Trujillo,

1998; Cruz, 2003; Imbach y Steinvorh, 2015), se hace referencia a la problemática de la deforestación, cambios de uso del suelo, incendios forestales y erosión hídrica en las cuencas de la región.

### Erosión Hídrica Potencial

La EHP con pérdidas de suelo extremas (mayores de 200 ton/ha/año) es la que se presenta en la mayor parte del territorio de la cuenca con el 71.46%, seguido de bajas tasas de pérdida de suelo (menores a 50 ton/ha/año) en el 20.94% de la superficie (Tabla 3). Las áreas con EHP extremas se ubican en los terrenos escarpados de la cuenca, principalmente por el efecto de la pendiente, el factor LS es muy

Tabla 3. Erosión Hídrica Potencial (EHP) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas

Categoría	Tasas de erosión (ton/ha/año)	Erosión Hídrica Potencial (EHP)	
		Hectáreas	%
Baja	0.0 - 50.0	4 839.230	20.94
Media	50.0 - 100.0	198.750	0.86
Severa	100.0 - 150.0	649.034	2.81
Alta	150.0 - 200.0	401.109	1.74
Muy alta	200.0 - 250.0	505.888	2.19
Extrema	> 250.0	16 511.506	71.46
Totales		23 105.517	100.00

Fuente: elaboración propia.

significativo en la estimación de la EHP (Rivera *et al.*, 2012) así como de la textura arenosa de los suelos (factor K). Por su parte, las áreas con bajas tasas de pérdida de suelo se ubican en la planicie costera en terrenos con pendientes muy suaves.

#### *Erosión Hídrica Actual*

La diferencia entre los valores de EHP y EHA representa el efecto del uso del suelo y la cobertura vegetal, lo cual define el SEH de regulación para el control de la erosión hídrica.

Como se muestra en la Tabla 4, los mayores porcentajes con EHA corresponden a tasas de pérdida de suelo menores a 50 ton/ha/año (cerca de un 60% del área de la cuenca) en la planicie costera y terrenos intermedios o laderas suaves con cobertura vegetal, seguidas por las de erosión extrema con pérdidas de suelo mayores a 250 ton/ha/año (alrededor del 30%) en terrenos escarpados de la cuenca. Las tasas de pérdida de suelo de 50 a 250 ton/ha/año son siempre menores (menores al 10%) y se ubican según su grado de pendiente, en terrenos ondulados, en laderas con pendientes de suaves a moderadas o en pequeños valles inter-montanos. En la cuenca del río Zanatenco, la distribución del tipo de vegetación está asociada a la elevación altitudinal que corresponde a las partes baja, media o alta de la cuenca (CONANP, 1999).

De 1985 a 2011, mientras la EHP es extrema en un 71% de la cuenca, la EHA extrema se presenta, en promedio, en el 30% del área de la cuenca debido al efecto de la cobertura vegetal que define el SEH de regulación para el control de la erosión hídrica.

La media armónica de la pérdida de suelo por EHA muestra una pequeña tendencia decreciente de 140 a 125 ton/ha/año de 1985 a 2011, debido a que las áreas con EHA baja representan en promedio el 60% de la superficie de la cuenca (Figura 6).

En la cuenca del río Zanatenco, Torres, Tavares y Cortés (2002) estiman, mediante la aplicación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que un 57% de la cuenca presenta erosión hídrica baja, un 35.12% erosión moderada y un 12.3% erosión alta, resultados análogos a los obtenidos en el presente estudio para 2002.

Según se muestra en la Tabla 4, en general las áreas con tasas de pérdida de suelo menores a 50 ton/ha/año presentan una tendencia creciente de 1985 (58.94%) al 2011 (63.01%) en terrenos ubicados principalmente en la planicie costera o con cobertura de pastizales. Las reas con erosión extrema presentan un abatimiento de 1985 a 2002 al pasar del 41.89% a 28.82% debido al proceso de resiliencia y sucesión vegetal natural después del impacto de las inundaciones de septiembre de 1998, para posteriormente incrementarse a 29.59% en 2011 después de las inundaciones

Tabla 4. Erosión Hídrica Actual (EHA) para diferentes periodos de uso del suelo en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas.

Tasas de erosión (ton/ha/año)	Superficie (hectáreas)				
	1985	1993	2002	2007	2011
0.0 - 50.0	11 422.028	11 856.875	12 873.030	13 028.534	13 033.901
50.0 - 100.0	560.776	620.674	551.914	470.821	467.025
100.0 - 150.0	440.894	351.396	262.274	223.502	222.793
150.0 - 200.0	498.426	538.092	442.021	387.627	384.720
200.0 - 250.0	504.578	603.387	520.337	457.570	453.262
> 250.0	9 678.817	9 135.093	8 455.941	8 537.462	8 543.816
Totales	23 105.517	23 105.517	23 105.517	23 105.517	23 105.517
Media armónica (ton/ha/año)	140.450	135.420	126.200	125.840	125.860

Fuente: elaboración propia.

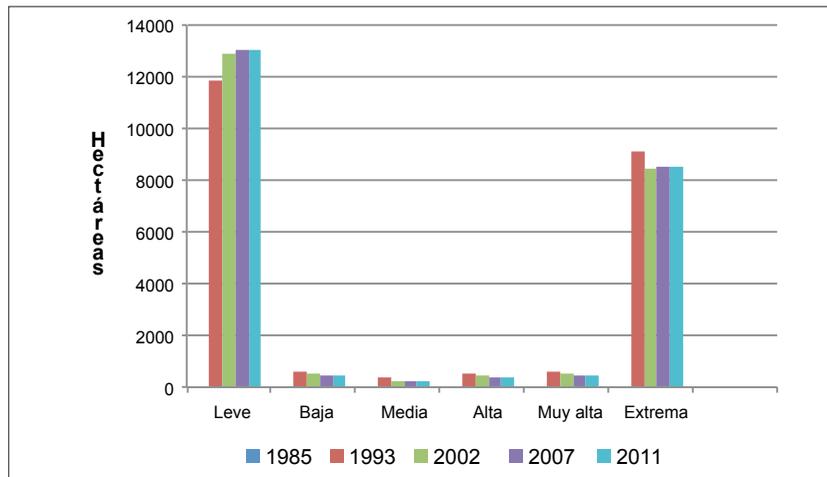


Figura 6. Erosión Hídrica Actual (EHA) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1985-2011). Fuente: elaboración propia.

de octubre de 2005 con el ciclón tropical *Stan* (Tabla 4).

En la cuenca del río Huehuetán, Chiapas, para los usos del suelo antes y después del impacto del ciclón tropical *Stan* en 2005, Juárez *et al.* (2007) obtienen prácticamente los mismos escurrimientos máximos con las lluvias extremas del *Stan*. Lo anterior debido a los servicios hidrológicos de regulación o efecto amortiguador que la cobertura vegetal de la cuenca provee ante las lluvias extremas (Arellano, 2012). Por otra parte, en una cuenca con el 40% de su área deforestada en Fool Creek, Colorado EU, se incrementa en promedio el escurrimiento anual, el gasto pico en un 23% y el volumen de inundación en un 8% (Troendle y King, 1985).

De 2004 a 2008, Cortina-Villar *et al.* (2012) reportan que un 18% de la superficie forestal del área de amortiguamiento de la REBISE fue apoyada con el programa de PSAH. Después del impacto del huracán *Barbara* en la región Istmo-Costa de Chiapas en mayo de 2013, Conservación Internacional (2013) elaboró una evaluación de su impacto en la REBISE, donde con la aplicación de la EUPS reporta que antes del impacto del huracán, un 32.28% de la REBISE (54 007 hectáreas) presentaba EHA extrema, con pérdidas de suelo mayores a 500 ton/ha/año, y después del impacto del huracán la erosión extrema se presentó en el 43.88% del área, debido al impacto del huracán en 19 407 hectáreas con tasas de erosión hídrica extremas.

En la cuenca del río Zanatenco, las áreas con mayores tasas de pérdida de suelo corresponden a las áreas con deforestación para cambio de uso del suelo de selva media a pastizal, particularmente durante el periodo de 1985 a 1993 (Tabla 1). La deforestación de la vegetación de bosques y selvas para el establecimiento de potreros provoca la compactación del suelo, lo cual disminuye la infiltración del agua de lluvia, con incrementos en el volumen de escurrimiento superficial, la erosión hídrica, el gasto pico y un abatimiento del flujo base, como lo reporta Vásquez (2016) en las partes altas de las cuencas de los Andes colombianos.

### Servicios ecosistémicos hidrológicos de provisión de agua

#### *El balance hídrico anual*

De 1961 al 2009 se presentó en la cuenca de estudio un exceso de humedad en ocho años, mientras que 25 años fueron años secos; es decir, siete de cada diez años fueron secos (Tabla 2). Los años secos están asociados a la presencia del fenómeno de El Niño, reportados por Magaña *et al.* (2004). Según Tiscareño *et al.* (1991), se presenta un patrón en el incremento de la erosión hídrica conforme las regiones agroecológicas se vuelven más secas, lo cual indica que el fenómeno de El Niño, como el del periodo 1997-1998, afectó de manera significativa a las regiones con mayor grado de degradación del suelo por erosión hídrica, como es el caso de la Costa de Chiapas.

En la cuenca del río Zanatenco, se obtiene una tendencia interanual decreciente del balance de humedad a una tasa de  $-17.87$  mm/año con un  $R^2$  de  $0.2227$  (Figura 7). Se presenta entonces en la cuenca una tendencia hacia la presencia de años cada vez más secos con una menor disponibilidad de agua y con mayor demanda de agua para los diferentes usos. Una mayor demanda hídrica para el desarrollo de los cultivos es un efecto de la variabilidad climática (Ojeda, Sifuentes, Iñiguez y Montes, 2011); al presentarse años más secos los cultivos demandarán más agua.

El año más húmedo fue 1963 con  $+279.7$  mm, y el año con mayor déficit de humedad o más seco fue 1987 con  $-1283.5$  mm; así mismo los años 1976 con  $-1,015$  mm y de 2002 con  $-1038.5$  mm. De esta forma, los años secos y las condiciones de sequía han sido más frecuentes en la región (Tabla 5).

*Escorrentamiento superficial aforado*

Los ríos de la Costa de Chiapas son estacionales debido a que el régimen hidrológico está bien definido en periodos de lluvias y estiaje (Campos,

2014), así que los gastos máximos de escurrimiento se presentan de septiembre a octubre, mientras que en temporada de estiaje algunos ríos, como el Zanatenco, se secan (Baumann, 2000).

Durante el periodo de estiaje (noviembre a abril) en el río Zanatenco fluyen en promedio  $16.148$  millones de  $m^3$ , el  $16.08\%$  del escurrimiento anual; mientras que durante el periodo de lluvias (mayo a octubre) fluyen  $84.291$  millones de  $m^3$ , el  $83.92\%$ . En el periodo de lluvias escurre más de cinco veces lo que en promedio fluye en la temporada de secas (Figura 8, Tabla 5).

Cabe destacarse que para el periodo 1962-2009 los volúmenes anuales máximos de escurrimiento se presentaron en los años húmedos de 1969 (con el mayor escurrimiento registrado), 1963 y 1970, mientras que los años con menores volúmenes de escurrimiento anual fueron los años secos de 1990, 1983 y 1977 (con el menor escurrimiento registrado). Se estima un escurrimiento medio anual de  $639.66$  mm, equivalente a  $100.439$  millones de  $m^3$ , caudal que representa la disponibilidad media anual de agua en el río (Tabla 5).

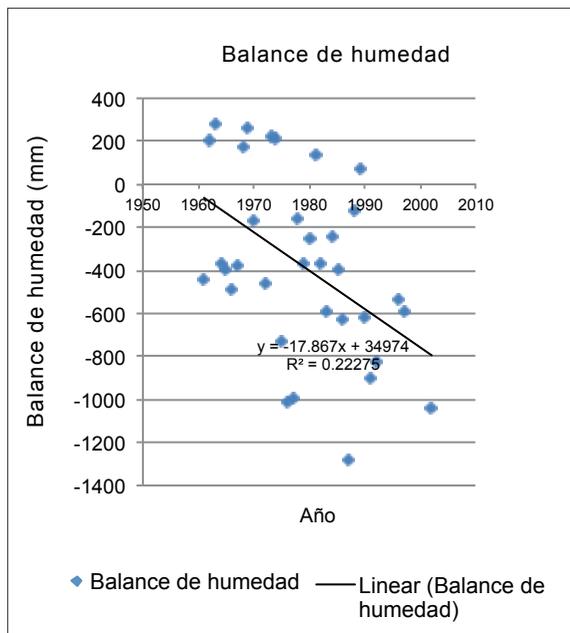


Figura 7. Variabilidad del balance de humedad (mm) en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (1961-2002). Fuente: elaboración propia con base en datos de la estación climatológica.

Tabla 5. Volumen de escurrimiento medio mensual en el río Zanatenco, Chiapas (1961-2009).

Mes	Escorrentamiento mensual (miles de m³)		
	Mínimo	Promedio	Máximo
Enero	21.24	1928.893	8415.19
Febrero	0	1497.901	17 710.39
Marzo	0	805.145	8518.02
Abril	0	453.241	3665.08
Mayo	0	1880.489	6887.24
Junio	2349.92	7851.381	21 815.95
Julio	1246.97	9663.185	28 514.77
Agosto	2240.00	12 638.379	65 681.84
Septiembre	2395.70	32 217.657	13 0875.5
Octubre	4713.52	20 039.977	52 723.78
Noviembre	1324.32	7815.547	22 341.04
Diciembre	370.98	3648.188	12 672.39
Anual	23709.70	100 439.982	247 136.74

Fuente: elaboración propia con base en datos de la estación hidrométrica.

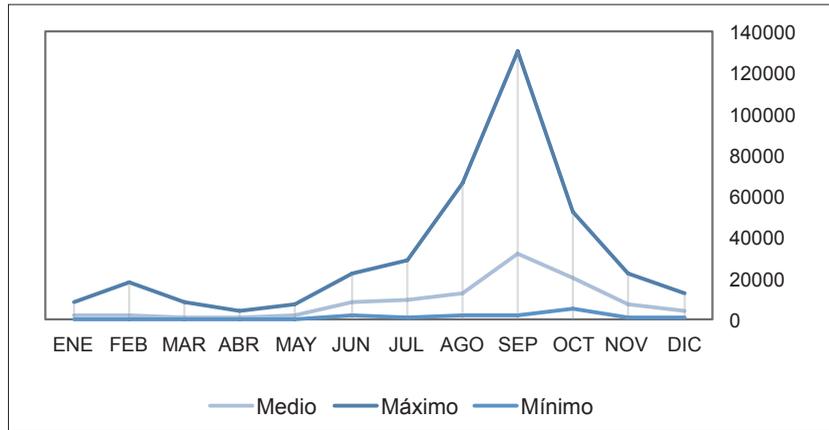


Figura 8. Volúmenes de escurrimiento medios mensuales (miles de m<sup>3</sup>) en el río Zanatenco, Chiapas (1962-2009). Fuente: elaboración propia con base en datos de la estación hidrométrica.

*Escorrimento superficial estimado*

Según el Decreto de disponibilidad de agua en la cuenca de la Laguna Mar Muerto, de la cual forma parte la cuenca del río Zanatenco (SEMARNAT y CONAGUA, 2007), se estima para la cuenca de estudio un volumen medio anual de escurrimiento superficial de 521.24 mm.

Para el río Zanatenco, el escurrimiento medio anual aforado obtenido es de 639.66 mm (100.439 millones de m<sup>3</sup>) mientras que el escurrimiento medio anual estimado con el Decreto de disponibilidad es de 521.24 mm (81.845 millones de m<sup>3</sup>). Los resultados obtenidos son diferentes debido a que mientras en el Decreto se estima mediante métodos indirectos el escurrimiento superficial para la Región Hidrológica, los datos hidrométricos son los que corresponden al registro de aforo disponible del río Zanatenco.

*Aguas subterráneas*

Según el Decreto de disponibilidad del acuífero Arriaga-Pijijiapan (SEMARNAT y CONAGUA, 2007), y considerando que el área de influencia del acuífero correspondiente a la unidad fisiográfica de la llanura costera de la cuenca del río Zanatenco representa 73.3003 km<sup>2</sup>, se estima una disponibilidad media anual del acuífero en la cuenca de 1.432673 millones de m<sup>3</sup>.

**La oferta y demanda de agua en la cuenca**

Debido a que no se dispone de un estudio geohidrológico del área de estudio, y con el propósito

de hacer un estudio comparativo entre la oferta y la demanda tanto de aguas superficiales como subterráneas, se decidió utilizar para la estimación de la oferta y demanda de agua, el método de los Decretos de disponibilidad de CONAGUA para la estimación de la oferta de aguas superficiales como subterráneas de la cuenca del río Zanatenco.

*Oferta de agua*

La oferta o disponibilidad promedio anual de agua total en la cuenca del río Zanatenco es de 83.277673 millones de m<sup>3</sup>; de los cuales, 81.845 millones de m<sup>3</sup> corresponden al agua superficial (98.28%) y 1.432673 millones de m<sup>3</sup> a aguas subterráneas (1.72%) (Tabla 6).

*Demanda de agua*

En la cuenca de estudio únicamente se presentan los usos del agua público urbano y pecuario. Los usos del agua para riego agrícola y el uso industrial

Tabla 6. Oferta de agua en el agua en la cuenca del río Zanatenco.

Aguas superficiales		Aguas subterráneas		Totales
Millones de m <sup>3</sup>	%	Millones de m <sup>3</sup>	%	Millones de m <sup>3</sup>
81.845	98.28	1.432673	1.72	83.277673

Fuente: elaboración propia con base en los decretos de disponibilidad (CONAGUA, 2002; SEMARNAT y CONAGUA, 2007).

geográficamente se ubican en las cuencas adyacentes. Así, para el año de 2012 se tenía registrado en el REPDA un volumen anual concesionado (superficial y subterráneo) o comprometido de 5.740360 millones de m<sup>3</sup>; de los cuales 5.730328 millones de m<sup>3</sup> (98.9%) provienen de aguas superficiales, y 0.010032 millones de m<sup>3</sup> (1.1%) de aguas subterráneas (Tabla 7).

De las aguas superficiales, un 99.97% corresponden al uso público urbano y un 0.03% al uso pecuario o de abrevadero para ganado.

Se dispone de un volumen de aguas superficiales promedio anual de 81.845 millones de m<sup>3</sup> (oferta) y se tienen comprometidos 5.730329 millones de m<sup>3</sup> (demanda). De esta forma, se tiene, en promedio anual, disponibilidad de agua superficial en la cuenca. Sin embargo, es la distribución a lo largo del año lo que ocasiona el severo déficit de agua, particularmente en la temporada de estiaje, cuando el volumen de agua disponible se abate significativamente, e incluso es nulo cuando se seca el río Zanatenco.

Con respecto al acuífero de la cuenca, se tiene una disponibilidad (oferta) de agua de 1.432673 millones de m<sup>3</sup> y un volumen anual promedio de extracción de agua subterránea (demanda) de 0.010032 millones de m<sup>3</sup>, por lo que la parte de la cuenca del río Zanatenco incluida dentro del

acuífero Arriaga-Pijijiapan se clasifica con disponibilidad de agua total anual (Tabla 8).

Para el abastecimiento de agua a la población en la cuenca, el total del agua concesionada hasta el 2012 provenía de aprovechamientos superficiales y no del acuífero (pozos profundos). Se tiene concesionado un volumen anual de 5.728578 millones de m<sup>3</sup> para uso público urbano, principalmente para el abastecimiento de la población en la cabecera municipal de Tonalá, a quien se destina el 97.34% del agua del río Zanatenco.

Ante la cada vez más frecuente escasez de agua del río, particularmente en los últimos años, el Ayuntamiento Municipal de Tonalá ha propuesto la construcción de una presa de almacenamiento en el arroyo tributario de La Flor, localizado en la parte alta de la cuenca, para el abastecimiento de agua a la cabecera municipal. A la fecha, no se cuenta con el proyecto ejecutivo ni con recursos para su ejecución. Sin embargo, ninguna instancia gubernamental ha propuesto la restauración de la cuenca, estrategia más eficaz y sostenible para la recuperación de los SEH.

El volumen anual concesionado para uso público urbano de 5.728578 millones de m<sup>3</sup> equivale a un volumen mensual de 477.3815 miles de m<sup>3</sup>, pero en los meses de febrero a mayo, cuando los volúmenes mínimos promedio disponibles son

Tabla 7. Volumen concesionado de agua superficial y subterránea en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas (2012).

Uso	Superficiales		Subterráneos		Totales	
	(m <sup>3</sup> )	(%)	(m <sup>3</sup> )	(%)	(m <sup>3</sup> )	(%)
Público urbano	5,728,578.63	99.97	0.00	0.00	5,728,578.63	99.79
Pecuario	1,750.00	0.03	10,032.22	100.00	11,782.22	0.21
Totales	5,730,328.63	100.00	10,032.22	100.00	5,740,360.85	100.00

Fuente: elaboración propia según la base de datos del REPDA.

Tabla 8. Relación entre la oferta y la demanda de agua en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas.

Aguas superficiales		Aguas subterráneas		Totales	
Oferta (M m <sup>3</sup> )	Demanda (M m <sup>3</sup> )	Oferta (Mm <sup>3</sup> )	Demanda (Mm <sup>3</sup> )	Oferta (Mm <sup>3</sup> )	Demanda (Mm <sup>3</sup> )
81.845	5.730328	1.432673	0.010032	83.277673	5.74036

Fuente: elaboración propia con base en información hidrométrica y REPDA.

nulos en el río Zanatenco, se presenta un déficit de agua para abastecer a la población de la cabecera municipal. Diversos esquemas de captación y almacenamiento del agua de lluvia, permitirían disponer del agua los durante la temporada de secas. No obstante, la única respuesta gubernamental a la escasez es la apertura de pozos profundos, medida que atiende la emergencia ante la severa sequía, pero que no abona a la solución del problema de fondo a mediano y largo plazo.

En entrevista con el director del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Municipal (SAPAM) de Tonalá, refiere que en marzo de 2016 había cinco pozos profundos en operación para abastecer las necesidades de la población, de los que se obtenía en promedio un caudal de 68 litros/seg. Estima que para atender la demanda actual de la ciudad de Tonalá, se requeriría de un caudal de 120 litros/seg. La respuesta del gobierno municipal fue la perforación de tres pozos más para su operación en el mes de abril de ese año. Anteriormente en la región, las profundidades de perforación de pozos eran de 20 a 30 metros, actualmente debido al abatimiento del nivel freático del acuífero son de 60 a 90 metros por lo que es necesario realizar un estudio geohidrológico regional. En mayo de 2016, la Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Estado de Chiapas emitió Decreto de emergencia por sequía, pero no fue objeto de apoyo por parte del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN). Los altos costos de la perforación y rehabilitación de pozos únicamente acrecientan la deuda del Ayuntamiento, pero no atiende la severa reducción de los servicios hidrológicos de provisión de la cuenca.

## CONCLUSIONES

La cuenca del río Zanatenco provee los SEH de regulación de los flujos de agua (relaciones lluvia-escurrimiento y control de erosión hídrica), así como de aprovisionamiento de agua, SE que se están reduciendo ante las transformaciones ambientales y modificaciones en el clima.

De 1985-2011, la superficie con selva mediana disminuyó del 51.4% al 39.8%. La superficie de-

dicada a la ganadería representa cerca del 40%, en contraste con el 12% de la agricultura de temporal. Los cambios en la cobertura vegetal más significativos se presentaron de 1993 a 2002, periodo con mayor pérdida de suelo por erosión hídrica, escurrimientos superficiales y riesgos de deslizamientos e inundaciones, particularmente con las lluvias extremas e inundaciones de septiembre de 1998 y octubre de 2005.

El escurrimiento anual del río Zanatenco muestra una tendencia interanual decreciente, con una disminución en la disponibilidad anual equivale a 2.365 millones de m<sup>3</sup>.

El coeficiente de escurrimiento presenta una tendencia interanual decreciente de -1.54 %/año, con un máximo de 84.05% en 1968 (año húmedo) y un mínimo de 12.89% en 1977 (año seco). En los últimos años, una menor precipitación y coeficiente de escurrimiento, junto con un mayor déficit de humedad, provocan que la mayor parte de la lluvia se infiltre, pero no alcance a escurrir ni a percolarse profundamente para después incorporarse al acuífero o descargar en la temporada de estiaje como flujo base. Las condiciones anteriores definen el régimen hidrológico estacional del río Zanatenco y los SEH de regulación y provisión que proporciona la cuenca.

La EHP extrema, con pérdidas de suelo mayores a 250 ton/ha/año, representa el 72% de la cuenca, mientras que la EHA extrema en todos los años de estudio representa alrededor del 30%. Entonces, la cobertura vegetal de la cuenca, particularmente de la REBISE, proporciona el SEH de regulación para el control de la erosión hídrica.

En 8 de los 33 años de registro se presentó exceso de humedad (32%), mientras que 25 fueron años secos (68%); es decir, siete de cada diez años fueron secos.

Debido a la importancia de la ganadería en la región, el 100% de las aguas subterráneas concesionadas en la cuenca del río Zanatenco en el año 2012 se utilizan para abrevadero de ganado, con un volumen concesionado anual de 10,032.22 m<sup>3</sup>.

En la cuenca se tiene concesionado un volumen anual de 5.728 millones de m<sup>3</sup> para abastecimiento de agua a la cabecera municipal de Tonalá (el 97.34% del agua superficial concesionada). Sin em-

bargo, ante el abatimiento del río en la temporada de estiaje, su tendencia decreciente y los periodos de sequía cada vez más frecuentes e intensos asociados a la variabilidad climática, se presenta un desequilibrio hídrico para el abastecimiento de agua a la población.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran la pertinencia de realizar la evaluación de los SEH a nivel de cuenca. Por otra parte, permitirán orientar los esfuerzos del ayuntamiento de Tonalá y del propio Comité de Cuenca de río Zanatenco para la instrumentación de un programa de rehabilitación hidrológico ambiental de la cuenca que permita la conservación de los SEH que proporciona.

## REFERENCIAS

- Alix-García, J. y Wolff, H. (2014). Payment for ecosystem service from forests. *Annual Review of Resources Economics*, 6, 361-380.
- Alix-García, J., Shapiro, N. E. y Sims, R. E. K. (2012). Forests conservation and slippage: Evidence from Mexico's national payments for ecosystem program. *Land Economics*, 88(4), 613-638.
- Andréassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1-27.
- Arellano, M. J. L. (1994). *La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas: Evaluación y principios tecnológicos para su control*. Tesis profesional, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Arellano, M. J. L. (2010). Gestión Integral de Recursos Hídricos para reducir la Vulnerabilidad a Deslizamientos e Inundaciones en las Cuencas de la Sierra Madre de Chiapas. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 2(1), 29-37.
- Arellano, M. J. L. (2012). *Vulnerabilidad y Gestión de Riesgos por Deslizamientos e Inundaciones en la Cuenca Superior del río Huehuetán, Chiapas*. Tesis de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Jiutepec, Morelos.
- Ausseil A., Dymond, J. R., Kirschbaum, M. U. F., Andrew, R. M. y Parfitt, R. L. (2013). Assessment of multiple ecosystem services in New Zealand at the catchment scale. *Environmental Modelling & Software*, 43, 37-48.
- Balvanera P. y Cotler, H. (2007). Los servicios ecosistémicos y la toma de decisiones: retos y perspectivas. *Gaceta Ecológica*, 84-85, 117-123.
- Balvanera P., Armendáriz, C. y Tauro, A. (2016). Los servicios ecosistémicos. En P. Balvanera, J. E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero y J. J. Schmitter-Soto (eds.), *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México*. Ciudad de México: UNAM.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 21(1-2), 136-147.
- Baumann, J. (2000). *Plan de conservación de suelos y agua para la costa de Chiapas*. México: Comisión Nacional del Agua y Centro para Migración y Desarrollo Internacional.
- Baumann, J. y Arellano, M. J. L. (2003). Measuring rainfall erosivity characteristics and annual R-factors adjustment of the USLE in tropical climate. En D. Gabriel y W. Cornelis (eds.), *25 years of assessment of erosion. Proceedings of the International Conference* (pp. 67-74). Bélgica: Ghent University.
- Bergkamp, G. Smith, M. (2006). Incentives for Water Security. En M. Smith, D. De Groot, D. Perrot-Maite y G. Bergkamp, *Pay-establishing payments for watershed services*. Gland, Suiza: UICN.
- Blume T., Zehe, E. y Bronstert, E. (2007). Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences*, 52(5), 843-862.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104(1), 185-228.
- Campos, A. D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. San Luis Potosí, México: edición del autor.
- Campos, A. D. F. (2009). Calibración del método del coeficiente de escurrimiento para la estimación de la disponibilidad anual en dos zonas geográficas de México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXIV(3), 131-143.
- Campos, A. D. F. (2014). Coeficientes de escurrimiento promedio mensuales: Comportamiento y aplicación en la estimación de la disponibilidad. *Revista Digital Tláloc*. Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Cano C., Andreoli, A., Arumi, J. L. y Rivera, D. (2014). Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(4), 145-151.
- Carvalho-Santos, C., Pradinho, J. y Hein, L. (2014). Hydrological services and the role of forest: Conceptualization and indicator-based analysis with an

- illustration at a regional scale. *Ecological Complexity*, 20, 69-80.
- Castro, M. I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 3-16.
- CONAGUA, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C., The Nature Conservancy, INESA. (2010a). *Aplicación de la Tarjeta de Evaluación de Cuencas Hidrográficas en la cuenca del río Lagartero, Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: The Nature Conservancy.
- CONAGUA, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C., The Nature Conservancy, INESA. (2010b). *Aplicación de la Tarjeta de Evaluación de Cuencas Hidrográficas en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: The Nature Conservancy.
- CONAGUA, INESA y Ayuntamiento de Tonalá. (2009). *Plan de Gestión Integral de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- CONAGUA, UNICACH, Instituto Estatal del Agua y Ayuntamiento de Tonalá (2012), *Plan de Gestión Integral de la cuenca del río Tiltepec, Chiapas*, Tonalá, Chiapas.
- CONAGUA. (2002). Norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000: Conservación del recurso agua. *Diario Oficial de la Federación*. México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2010). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). México: Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR).
- CONANP. (1999). *Programa de Manejo Reserva de la Biosfera La Sepultura, México*. México: SEMARNAP, CONANP.
- Conservación Internacional. (2012). *Lecciones aprendidas sobre el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos de 1998 y 2005 y su relación con el cambio de uso de suelo. Informe final*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Conservación Internacional, Universidad Autónoma de Chiapas, Proyecto ECOSECHAS.
- Cortina-Villar, S., Plascencia-Vargas, H., Schroth, G., Zepeda, Y., Soto-Pinto, L., y Nahed-Toral, J. (2012). Resolving the conflict between ecosystem protection and land use in protected areas of the Sierra Madre of Chiapas, Mexico. *Environmental Management*, 49(3), 649-662.
- Cruz, R. M. (2003). Plan Rector de Producción y Conservación de las microcuencas La Mica y Poza Galana en la Subcuenca del río Lagartero del Municipio de Arriaga, Chiapas. En M. J. L. Arellano y M. J. López (Coords.), *Memorias del 3er Seminario sobre Manejo y Conservación del Suelo y Agua en Chiapas. Manejo Integral de Cuencas* (pp. 135-140). Tuxtla, Gutiérrez, Chiapas: Consejo Ciudadano del Agua en Chiapas, A. C., SEMARNAT, INIFAP, The Nature Conservancy.
- Daily, G. C. (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington, D. C.: Island Press.
- De Groot, R., Wilson, M. y Boumans, R. (2002). A typology for the classification, descriptions and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41, 393-408.
- De la Fuente J., Lisle, T. y McKean, J. (2010). Deslizamientos de Tierra, Erosión de Canales y Sedimentación en la Vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas, México, durante el Huracán Stan en 2005: Reseña de Campo con Recomendaciones. Informe Final. Tuxtla, Gutiérrez, Chiapas: Servicio Forestal de los Estados Unidos, The Nature Conservancy.
- Figuroa, J. M. L., Ibáñez, C. L., Arteaga, R. R., Arellano, M. J. L. y Vázquez, P. M. (2011). Cambios de uso del suelo en la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, México. *Agrociencia*, 45, 531-544.
- IMTA. (2013). *ERIC III. Extractor rápido de información climática. Ver 3.2* [cd-rom].
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie V. Aguascalientes, México: INEGI*.
- Infante Gil, S. y Zárate de Lara, G. (1984). *Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario*. México: Editorial Trillas.
- Juárez, M. J., Ibáñez, C. L., Pérez, N. S. y Arellano, M. J. L. (2010). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69-76.
- Kabeya, N., Shimizu, A., Shimizu, T., Ikuzawa, H., Arakaki, T., Furugen, H., Ohnuki, Y. y Asano, S. (2014). Rainfall and runoff observations in the subtropical forest of Okinawa Island, Japan. *Journal of Water Resources and Protection*, 6, 625-634.
- Lucero, R., Medina, J. y Cervantes, Y. (1994). Los usos del suelo. En A. Toledo (Coord.), *Riqueza y pobreza en la costa de Chiapas y Oaxaca* (pp. 211-313). México: Centro de Ecología y Desarrollo, A. C.
- Magaña, V., Matías, M. J., Morales, R., y Millán, C. (2004). Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. En J. Martínez y A. Fernández B., (Comps.). *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 203-213). México: SEMARNAT, INE.
- Martínez Harms, M. J. y Balvanera, P. (2012). Methods for mapping ecosystem service supply: A review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem & Management*, 1, 1-9.
- Martínez, A. P. (2007). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Jiutepec, Morelos, México: SEMARNAT, IMTA.

- Mendoza, M. E., López, G. E., Geneletti, D. y Pérez-Salicrup, D. R. (2011). Analysing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo, Mexico (1975-2003). *Applied Geography*, 31, 237-250.
- Metzger, M. J., Rounsecell, M. D. A., Acosta-Michlink, L., Leemans, R. y Schroter, D. (2006). The vulnerability of ecosystem services to land change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114, 69-85.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystem and human Well-Being: Synthesis*. Washington, D. C.: Island Press.
- Mocondoko, D. P., García, C. I., Martínez, O. A. y Manson, R. (s/f). Cartografía de zonas prioritarias que proveen servicios ambientales hidrológicos en cafetales: caso de la zona centro del estado de Veracruz. En *Cafeticultura en la zona centro del estado de Veracruz: Diagnóstico, productividad y servicios ambientales*. Veracruz: SAGARPA.
- Montes, L. M. A., Uribe, A. E. M. y García, C. E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 5-17.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., Iñiguez, C. M. y Montes, M. M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45, 1-11.
- Oyarzún, E. C., Nahuelhual, L. y Núñez, D. (2005). Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista ambiente y desarrollo*, XXI(1), 88-95.
- Peñuela, A. L. A. (2014). El agua subterránea en el estudio de servicios ambientales. En M. Perevchtchikova (Coord.), *Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México un acercamiento para su estudio* (pp. 113-130). México: El Colegio de México.
- Perevchtchikova, M. (2012). Aproximación teórico-conceptual a los estudios de servicios ecosistémicos, ambientales y esquemas de compensación. En: M. Perevchtchikova (Coord.), *Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México un acercamiento para su estudio* (pp. 17-39). México: El Colegio de México.
- Perevchtchikova, M. y Ochoa, M. (2012). Avances y limitantes del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2009. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 89-112.
- Perevchtchikova, M. y Oggioni, J. (2014). Global and Mexican analytical review of the state of the art on ecosystem and environmental services: a geographical approach. *Investigaciones Geográficas*, 85, 47-65.
- Pérez, N. S., Arellano, M. J. L., Ibáñez, C. L. A. y Hernández, S. F. R. (2012). Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 104-110.
- Porras, I., Grieg-Gran, M. y Neves, N. (2008). *All that glitters: A review of payments for watershed services in developing countries*. Natural Resources Issues, No. 11. Londres: International Institute for Environment and Development.
- Rivera Toral, F., Pérez, N. S., Ibáñez, C. L. A. y Hernández, S. F. R. (2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46, 101-105.
- SEMARNAT y CONAGUA. (2007, 11 de junio). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas de la Laguna Mar Muerto A, Tapanatepec, Laguna Mar Muerto B, Las Arenas, La Punta, Laguna Mar Muerto C, Sanatenco, Laguna La joya, Jesús, El Porvenir, San Diego, Pijijiapan, Margaritas y Coapa, Novillero Alto, Sesecapa, Cacaluta, Laguna del Viejo y Tembladeras, Des poblado, Huixtla, Huehuetán, Coatán, Puerto Madero, Cahuacán, Cozoloapan y Suchiate, mismos que forman parte de la región hidrológica número 23 Costa de Chiapas. *Diario Oficial de la Federación*. México: Secretaría de Gobernación.
- SEMARNAT. (2012). *México. Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, INECC.
- Serrano, A. V., Díaz, P. G., López, L. A., Cano, G. M. A., Báez, G. A. y Garrido, R. E. (2006). *Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Chiapas (periodo 1961-2003)*, Libro Técnico No. 1, Campo Agrícola Experimental Centro de Chiapas. Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas: INIFAP.
- SRH. (1969). *Boletín Hidrológico Número 23 (Costa de Chiapas) y Número 29 (Coatzacoalcos)*. México: Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), Jefatura de Irrigación y Control de Ríos.
- Tiscareño, L. M., Rosenberg, N. J., Legler, D. M., Ruíz, C. A., Shrnvasan, R., Brown, R. A., García, M. G., Velázquez, V. M. y Izurralde, C. (1991). Algunos efectos del fenómeno El Niño en la agricultura mexicana. *Ciencia y Desarrollo*, XXV(139), 3-12.
- Torres, C. L.; Tavares, C. y Cortés, J. (2002). Evaluación de la pérdida de suelo en la Cuenca del río Zanatenco, Municipio de Tonalá, Chiapas. En *Memorias del III Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Arequipa, Perú.
- Troendle, C. A. y King, R. H. (1985). The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed, 30 years later. *Water Resources Research*, 21(12), 1915-1922.
- Trujillo, H. S. (1998). Experiencias en el control de la erosión en la cuenca del río Zanatenco, costa de Chiapas. En *Memorias del Seminario sobre manejo de suelos tropicales en Chiapas*, Cuadernos de Divulgación, 2º

- Seminario (pp. 161-166). San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur.
- Vásquez, V. G. (2016). Headwaters deforestation for cattle pastures in the Andes of Colombia and its implications for soils properties and hydrological dynamic. *Open Journal of Forestry*, 6, 337-347. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4236/ojfo.2016.65027>
- Vigerstol, K. L. y Juliann, E. A. (2011). A comparison of tool for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2403-2409.