

MODELACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA VALLE DE JOVEL, CHIAPAS, MÉXICO

José Antonio Santiago Lastra
Universidad Intercultural de Chiapas. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas.
e-mail: jlastra@unich.edu.mx

Jorge Faustino Manco y Beatriz Choque Guzmán
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
e-mail: faustino@catie.ac.cr

Carlos Alberto Ramírez Sosa
Corredor Biológico Mesoamericano. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas.
e-mail: carzsosa@gmail.com

Emmanuel Valencia Barrera
El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas
e-mail: evalenci@ecosur.mx

RESUMEN

Para reducir la vulnerabilidad a los eventos meteorológicos extremos e incrementar la resiliencia comunitaria, es necesario fortalecer las capacidades locales y hacer prevención a largo plazo. Para este fin, uno de los insumos útiles es el uso de modelos matemáticos que permitan predecir escenarios de las cuencas hidrológicas. Con este objetivo, se diseñó un modelo mediante SWAT para la cuenca Valle de Jovel en Chiapas, con base en un modelo digital de elevación y en parámetros de clima, suelo, cobertura vegetal y cambio climático. La simulación se corrió para 30 años, al comparar los resultados del modelo de simulación del escenario actual respecto del escenario de cambio climático, se observa que hay diferencias cuantitativas, se esperaría una reducción de la escorrentía superficial del orden del 16%, una reducción en la evaporación y evapotranspiración del 9% y también una reducción de la recarga del acuífero en un 6% y escorrentías excesivas.

Palabras clave: Agua, Escenarios climáticos, Humedales de montaña.

INTRODUCCIÓN

Las formas hegemónicas de producción, consumo y desecho fomentadas por el modelo de desarrollo capitalista patriarcal, es decir extractivista, autoritario, destructivo y excluyente, han conducido al ser humano a una crisis global (Leff, 2008) a lo cual se le ha llamado Cambio Climático Global. Este cambio se refiere a la alteración en la composición de la

atmosfera atribuida directa o indirectamente a las actividades humanas, y que exacerba el efecto invernadero, lo que conlleva a cambios en las variables climáticas.

Para el estado de Chiapas, México, se proyecta para los próximos 25 años, un aumento de la temperatura media anual entre los 0.8 y 1.6° C y

Cambio climático y cuencas hidrológicas

una reducción en la precipitación entre los -0.05 y -0.35 mm/d (Santiago-Lastra, 2015). Lo que significa años cada vez más calurosos y más secos con eventos meteorológicos extremos más frecuentes y severos. Esto último es evidente ante los desastres ocurridos en el estado en los últimos 10 años: Huracán Stan en octubre 2005, inundación de Tabasco y Chiapas en octubre de 2007, deslave en Juan de Grijalva en noviembre de 2007, inundación en San Cristóbal de Las Casas en septiembre de 2010, deslave en Amatlán en octubre de 2010, granizadas en San Cristóbal de Las Casas en 2011, lluvia severa en Tuxtla Gutiérrez en septiembre de 2011, lluvia severa en Ocoatepec, Pichucalco y Reforma en agosto de 2012, huracán Bárbara en mayo de 2013, torbellinos en San Cristóbal de Las Casas en 2014; sólo por mencionar algunos de los más significativos, y que fueron necesarios solicitar la declaratoria de zona de desastres y recurrir al Fondo de Desastres de México (FONDEN). Estos eventos meteorológicos extremos han causado alteraciones en los ecosistemas, pero sobre todo lesiones, enfermedades, defunciones y pérdidas económicas en las poblaciones humanas, quedando en evidencia la desigualdad y acentuando la vulnerabilidad y la pobreza.

Para reducir la vulnerabilidad a los eventos meteorológicos extremos, incrementar la resiliencia comunitaria y lograr una mejor adaptación al cambio climático global, es necesario fortalecer las capacidades locales y hacer prevención a largo plazo (Santiago-Lastra, 2015). Uno de los insumos útiles para la gestión integral local con enfoque territorial y de manera prospectiva, es el uso de modelos que permitan predecir escenarios futuros de las cuencas hidrológicas ante el cambio climático, entendida la cuenca como la unidad geográfica ideal para comprender el comportamiento hidrogeológico en los territorios y paisajes (Faustino & Watler, 2014) y bajo el hecho de que los principales impactos del cambio climático global ocurrirán a través del agua.

La cuenca Valle de Jovel.

La cuenca hidrológica del Valle de Jovel se localiza en la parte centro-norte del Estado de Chiapas, México en la región fisiográfica denominada Altiplanicie Central o Los Altos.

Esta cuenca nivel 6 (determinado mediante la metodología de Otto Pfafstetterse) forma parte del Alto Grijalva de la región hidrográfica Grijalva – Usumacinta (RH 30) de la vertiente del Golfo de México (Espíritu, 1998; García & Valencia, 2010). Es una cuenca arréica (abierta de forma artificial mediante un túnel de drenaje construido en el año de 1974) y semi alargada con una superficie de 28,560 Ha (Figura 1).

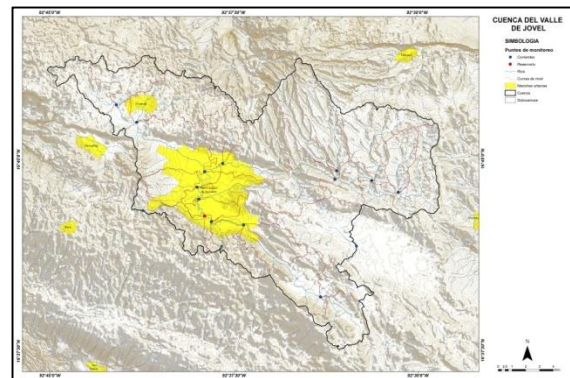


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Valle de Jovel.

La parte más baja de esta cuenca está a 2,110 msnm y corresponde al “sumidero” de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas en la parte centro-sur, y la más alta a 2,880 msnm que corresponde al volcán Tzontehuitz, ubicado al noreste de la cuenca (Figura 2). Presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temporada de secas que va de enero a mayo, la temperatura en la parte baja oscila entre los 12 y 24° C y en la parte alta entre 12 y 20° C, en enero se presentan heladas con temperaturas de hasta -3°C, la precipitación en la parte baja es entre 1,000 y 1,500 mm, en tanto que para la parte alta se encuentra en el rango de los 1,000 y 3,000 mm anuales (Espíritu, 1998; INEGI, 2013).

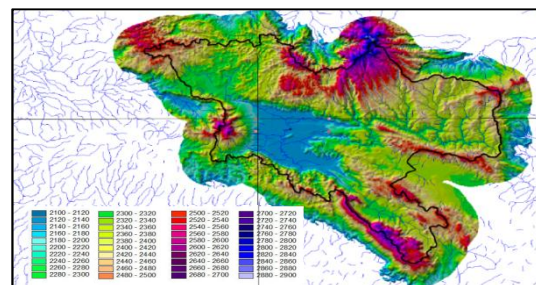


Figura 2. Elevación y delimitación de la cuenca Valle de Jovel (García & Valencia, 2010).

La cuenca forma cinco escorrentías principales (Figura 3): Río Fogótico, Río Chamula, Río Amarillo, Río San Felipe y Arrollo Navajuelos y un sistema de 225 Ha remanentes de humedales de montaña: La Kist y María Eugenia.

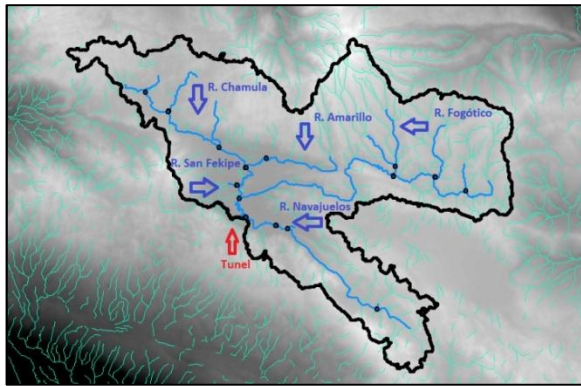


Figura 3. Hidrología de la cuenca Valle de Jovel.

a) *Caracterización biofísica:* Chiapas es la entidad federativa más sureña de México, colindante con Guatemala y el Océano Pacífico, y los estados de Oaxaca, Veracruz y Tabasco. Sus límites políticos son 14° 32' - 17° 59' N y 90° 22' - 94° 14' O. El territorio chiapaneco se ubica cerca del límite de la región neo tropical. La amplitud latitudinal de Chiapas, su historia geológica y su accidentada orografía determinan una enorme variedad de condiciones ecológicas y una notable diversidad biológica (González-Espinosa *et al.*, 2005).

Probablemente el mar cubría todo o parte de lo que actualmente es Chiapas y en su fondo, durante el Mesozoico (Cretácico) y Cenozoico (Paleoceno), se formaron las rocas sedimentarias (calizas -57%-) e ígneas extrusivas (toba intermedia -15%-) que durante el Terciario inferior ascendieron del fondo del mar y se convirtieron en lo que hoy conocemos como la región de Los Altos de Chiapas. De esa forma se inició un periodo de erosión y actividad volcánica, que abarca el Plioceno y el Cuaternario, acompañada de sedimentación y formación de los suelos Acrisol (44%), Luvisol (28%), Rendzina (20%) y Gleysol (3%) en la tierra firme de la región (Estrada *et al.*, 2013; INEGI, 2013).

En la región de Los Altos de Chiapas existe un tipo de comunidad vegetal denominado Bosque

de Pino-Encino (BPE) que se distribuye principalmente por encima de los 1,500 msnm. En bosques maduros es posible encontrar gran diversidad de flora y fauna, con dominancia de árboles en el dosel pertenecientes a los géneros de *Pinus* y *Quercus* (4-6 especies). En su interior albergan entre 20 y 30 especies de árboles latifoliados (*Crataegus pubescens*, *Alnus acuminata*, *Oreopanax xalapensis*, *Arbutus xalapensis*, *Cleyera theaeoides*, *Fuchsia paniculata*, *Myrsine juergensenii*, *Viburnum jucundum*, *Litsea glaucescens*, *Abies guatemalensis*, *Magnolia sharpii*, *Olmediella betschleriana*, por mencionar algunas) que en sus ramas y troncos soportan una alta diversidad de epifitas vasculares (helechos, orquídeas y bromelias). Este tipo de bosques es hábitat de conejos (*Sylvilagus jloridanus*), tlacuaches (*Didelphys marsupialis*), musarañas (*Sorex cristobalensis*, *Sorex stizodon* y *Criptatis griseoventris*), ardillas (*Sciurus aureogaste* y *Glaucmys volans*), zorras (*Urocyon cinereoargenteus*), zorrillos (*Conepatus leuconotus*), tuzas (*Orthogeomys hispidus*), ratones de monte (*Peromyscus* sp.), tecolotes (*Otus barbarus* y *Aegolius ridgwayi*), chipes (*Dendroica chysoparia* y *Ergaticus versicolor*), dominicos (*Carduelos atriceps*), carpinteros (*Melanerpes formicivorus*), lagartijas (*Anolis anisoleppis*) y culebras (*Bothrops tzotzilorum* y *Adelphicos nigrilatus*).

Sin embargo, en Los Altos de Chiapas, después de los años noventa, la tasa de deforestación alcanzó una de las más altas registradas, estimada en un 4.8% anual (Cayuela, 2006). Así, el BPE es un ecosistema altamente vulnerable y sujeto a fuertes perturbaciones humanas que ocasionan su disminución, fragmentación y empobrecimiento florístico (Ochoa-Gaona y González-Espinosa, 2000; Galindo-Jaimes *et al.*, 2002; Ramírez-Marcial *et al.*, 2005). La reducción más importante se produjo en el bosque de niebla, que es una de las asociaciones vegetales más importantes por su alta diversidad biológica, pasando de un 20% en el año de 1975 a tan sólo un 2% en el año 2000 (Cayuela, 2006). En la cuenca Valle de Jovel sólo quedan reductos de este importante ecosistema en las partes más altas de la cuenca, en los cerros Tzontehuitz (2,880 msnm), El Extranjero (2,740 msnm) y Huitepec (2,700 msnm) y han sido

clasificados como Regiones Terrestres Prioritarias de México (RTP-140) por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Aunque en la cuenca Valle de Jovel la tasa de deforestación no es tan alta como en el resto de la región (la superficie con bosque se ha reducido el 1% entre 1976 y 2010), más bien lo que ha ocurrido con sus bosques es un empobrecimiento florístico, al tiempo que las áreas de cultivo se han vuelto más intensivas y han cedido espacio a la urbanización o bien han pasado a pastizales por su abandono (Tabla 1).

Tabla 1. Estimación de las superficie por tipo de uso de suelo para la cuenca Valle de Jovel, con base en los análisis de Estrada et al., 2013.

Tipo de uso de suelo	1976		2010	
	Ha	%	Ha	%
Bosque	16,422.18	57.50	16,179.14	56.65
Pastizal	1,855.96	6.50	3,353.60	11.74
Agricultura	10,138.62	35.50	5,307.55	18.58
Zona urbana	143.14	0.50	3,719.61	13.02
Total	28,559.90	100.00	28,559.90	100.00

La cuenca Valle de Jovel también presenta otro tipo de ecosistema muy importante denominado “Humedal de Montaña” el cual es escaso no sólo en Chiapas sino en todo el mundo. Antes de la llegada de los españoles la parte baja de la cuenca era un gran humedal y se estima que desde la fundación de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, en 1528, se han perdido casi el 90% de su área original (López et al., 2008). Estos humedales se alimentan de los escurrimientos del bosque cuando llueve, de los ríos y de las redes de agua subterráneas. El 1 de febrero de 2008 mediante el decreto No. 137 publicado en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Chiapas el Honorable Congreso del Estado declaró 225 Ha como Área Natural Protegida con el carácter de Zona Sujeta a Conservación Ecológica. A esta superficie se le denominó “Humedales de Montaña La Kisst y María Eugenia” (Periódico Oficial, 2008). Una superficie de 35.7 Ha fue designada como humedal de importancia internacional y registradas en la lista de la Convención Ramsar

con el número 1787, el 2 de febrero de 2008. En estos humedales se presenta una gran diversidad de flora (principalmente herbáceas) y fauna (anfíbios, reptiles, peces y aves).

Una evaluación de su riqueza florística ha mostrado el reconocimiento de por lo menos 92 especies de plantas pertenecientes a 34 familias (Galindo-Jaimes et al., 2008). En dicho estudio se describe la presencia de especies muy abundantes que, sólo crecen en sitios con agua permanente, como son *Eleocharis albibracteata*, *Vulpia bromoides* y *Typha domingensis*. Otras especies (11) abundantes pero no recurrentes en agua permanente son: *Ambrosia cumanensis*, *Cyperus niger*, *Juncus ebracteatus*, *Trifolium repens*, *Cuphea hissiopifolia* y *Centella renifolia*. Sin embargo, la mayor parte de las especies son escasas o muy escasas (36 y 43 especies respectivamente) como *Escobedia lavéis*, *Sisyrinchium convolatum*, *Prunilla vulgaris*, *Polygonum punctatum*, *Cuphea eaquipetala*, *Sonchus aspera*, *Cosmos bipinnatus*, *Dortmannia cardenalis*, *Ipomoea orizabensis*, *Castilleja arvensis*, *Plantago australis*, *Mimulus glabrata* y *Berula erecta*.

De la fauna presente en los sistemas de humedales la Kisst y María Eugenia, sobresalen el pez micro endémico *Profundulus hildebrandi*, comúnmente denominado popoyote (Velázquez, 2001), la culebra de agua (*Thamnophis proximus alpinus*) y el dragoncito de labios rojos (*Abronia lythrochila*) también endémicos de la región, las poblaciones de estas especies se encuentran en peligro de extinción. Bajo la categoría de sujetos a protección especial se encuentran la ranita arborícola (*Plectrohyla pycnochila*) y la rana ladrona (*Eleutherodactylus glaucus*). Las poblaciones de estas especies están disminuyendo drásticamente, debido a que su hábitat disponible ha desaparecido en un 70% entre 1950 y 2000 (Velázquez y Schmitter, 2004).

Los Humedales de Montaña del Valle de Jovel también son refugio de aves residentes y migratorias, sobretodo de las anátidas, como la cerceta ala azul (*Anas discors*), la garza ceniza (*Ardea herodias*) y el martín pescador (*Ceryle alcyon*) que utilizan estos humedales como punto de descanso durante su recorrido migratorio. Se estima que son visitados cada año por más de 100 especies de aves migratorias que se trasladan

de Norteamérica hacia Sudamérica (Periódico Oficial, 2008).

La integridad de las especies que componen el ecosistema es fundamental, dado que los servicios ambientales más importantes que prestan los humedales son los de captar, filtrar, almacenar y proveer de agua. De ahí su enorme importancia para el ser humano y el medio ambiente (López *et al.*, 2008). Además cumplen múltiples funciones ambientales y proporcionan al hombre otros bienes y servicios.

b) Caracterización socioeconómica: La cuenca Valle de Jovel comprende cinco municipios de Los Altos de Chiapas: San Cristóbal de Las Casas, San Juan Chamula, Huixtán, Tenejapa y Zinacantán, con un total de poco más de 180,000 habitantes distribuidos en 86 localidades y de tres grupos lingüísticos: Tsotsil, Tzeltal y Español (Espíritu, 1998; Schenerock, 2010). En las Tablas 2 y 3 se presenta las proporciones de población y superficie que cada municipio ocupa dentro de la cuenca y en la Tabla 4 se presenta un análisis general de los principales problemas que presenta la cuenca y las posibles alternativas de solución.

Tabla 2. Distribución de la población por municipio de la cuenca Valle de Jovel.

Municipio	Localidades dentro de la cuenca	Población que vive dentro de la cuenca	Proporción de la población (%)
San Cristóbal	40	155,924	86.31
Chamula	42	23,275	12.88
Huixtán	2	1,033	0.57
Tenejapa	2	433	0.24
Zinacantán	0	0	0.00
Total	86	180,665	

Tabla 3. Distribución de la superficie por municipio de la cuenca Valle de Jovel.

Municipio	Superficie de la cuenca (Ha)	Proporción de la superficie (%)
San Cristóbal	15,435.0	54.05
Chamula	10,319.7	36.13
Huixtán	2,063.0	7.22
Tenejapa	642.8	2.25
Zinacantán	99.4	0.35
Total	28,559.9	

MATERIALES Y MÉTODOS

La modelación de los efectos del cambio climático en la cuenca Valle de Jovel se realizó mediante la herramienta SWAT de ArcGIS 10.2 (Esri Inc. 1999-2013). El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado por USDA Agricultural Research Service y Texas A&M AgriLife Research de la Universidad de Texas en la década de 1990 (SWAT, 2014), con el objetivo de contar con una herramienta que, basada en la ecuación del balance hídrico, fuera capaz de evaluar el impacto de las prácticas de manejo, de los cambios en el uso del suelo y del cambio climático global, en la calidad y cantidad de entrada, salida y almacenamiento de agua y sedimentos (nutrientes y otras sustancias químicas) en una cuenca (Ríos *et al.*, 2014).

Parametrización del modelo.

El modelo que se diseñó mediante SWAT para la cuenca Valle de Jovel se basó en un Modelo Digital de Elevación (MDE) obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI (WGS_1984_UTM_Zone_15N) y en los parámetros que se indican en la Tabla 5. La simulación se corrió para 30 años, en el periodo comprendido del 1 de enero de 1984 al 12 de diciembre de 2013, con tres años de llenado del sistema. El escenario de cambio climático ocupado fue proyectado para el estado de Chiapas (Santiago-Lastra, 2015) de acuerdo con la plataforma de resultados ofrecida por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014) de actualización de escenarios de cambio climático para un futuro cercano (2015 - 2039) y con Trayectorias de Concentraciones Representativas RCP4.5, el cual es un escenario de emisiones moderado, con una radiación global de energía de 4.5 Wm⁻² estable después del año 2100 y concentraciones de 650 p.p.m. de CO₂ (Moss *et al.*, 2010) y con la base de datos climáticos CRU versión TS3.1 (CRU, 2012).

Tabla 4. Matriz de diagnóstico de la cuenca Valle de Jovel.

Problemas	Causas	Consecuencias	Zonas de ubicación	Alternativas de solución
Deforestación , con una tasa estimada de 4.8% anual (Cayuela, 2006).	Aprovechamiento forestal no sustentable y apertura de nuevos espacios agropecuarios y urbanos.	Pérdida de hábitat para la vida silvestre, compactación y erosión de suelos.	Parte alta y media de la cuenca.	Campañas de restauración ecológica con especies leñosas locales y multipropósitos.
Agricultura convencional con alto uso de insumos sintéticos . El 94% de los productores hortícolas combaten las plagas con productos químicos altamente y extremadamente tóxicos de forma inadecuada (Santiago y Perales, 2007).	Aplicación de políticas de modernización agropecuaria, basadas en insumos industriales y fomento de las relaciones mercantiles.	Desarticulación y desequilibrio ambiental de los sistemas productivos tradicionales. Endeudamiento de los productores. Contaminación de suelo y agua. Daños a la salud de productores y consumidores.	Parte alta y media de la cuenca.	Programas de reconversión productiva para una agricultura orgánica y diversificada. Fortalecimiento de capacidades locales para el rescate de la soberanía alimentaria mediante sistemas agroecológicos.
Minería de material pétreo: arena, grava, laja y piedra. En 1940 se abrió la primera mina, a la fecha suman 52 puntos de extracción que representan aproximadamente 76 hectáreas de explotación, lo que equivale a un volumen estimado de material extraído de más de 38 millones de metros cúbicos (SEMAHN, 2012).	El eventual éxito económico ha propiciado la expansión de esta actividad, debido a que es una de las fuentes más importantes de suministros primarios para la industria de la construcción.	Pérdida de cobertura vegetal y suelo, pérdida del hábitat de fauna local y migratoria, alteración de las corrientes superficiales y subterráneas de agua, disminución de la recarga de los mantos freáticos y colonización humana inadecuada en zonas de alto riesgo.	Parte alta y media de la cuenca.	Ordenamiento territorial para definir áreas susceptibles de aprovechamiento. Desarrollar protocolos de restauración ecológica. Diseñar alternativas de manejo de dichas áreas una vez lograda su restauración, con la finalidad de que continúen ofreciendo un soporte económico y una fuente laboral.
Erosión hídrica de suelos. Los volúmenes de escurrimiento anual tendieron a aumentar de 77 millones m ³ en 1975 a 82 millones m ³ en 2009 (Figueroa-Jáuregui <i>et al.</i> , 2011).	La pérdida de cubierta forestal y el aumento de zonas agrícolas y urbanas.	Pérdida de fertilidad de los suelos y asolvamiento de los ríos y cuerpos de agua.	Toda la cuenca.	Campañas de restauración ecológica con especies leñosas locales. Diseño de sistemas agroecológicos con cobertura vegetal apropiada.
Generación de residuos sólidos . La ciudad de San Cristóbal producen aproximadamente 200 toneladas diarias de desechos sólidos (Santiago <i>et al.</i> , 2012).	El metabolismo que implican ciudades como San Cristóbal con una población de cerca de 200,000 habitantes y una población flotante que la triplica al año, bajo el modelo económico hegemónico consumistas.	Debido a la ausencia de sistemas de manejo y confinamiento de residuos sólidos, su desecho a cielo abierto provoca contaminación de suelo y agua por lixiviados, proliferación de fauna nociva y emisión de gases de efecto invernadero.	Cuenca baja.	Campañas de educación ambiental y consumo sano y responsable. Construcción de un centro de acopio y reciclaje de residuos sólidos. Construcción de un entierro sanitario.

Problemas	Causas	Consecuencias	Zonas de ubicación	Alternativas de solución
Contaminación de cuerpos superficiales y subterráneos de agua . Indicadores de DBO ₅ y DQO pasan de una calidad contaminada a calidad aceptable de la época de estiaje a la época de lluvias. Sin embargo, a pesar de diluir su contenido en época de lluvias, los valores de coliformes se encuentran por encima de los parámetros que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Estrada <i>et al.</i> , 2013).	Las descargas residuales domésticas y pluviales en la ciudad de San Cristóbal, aunque también contribuyen las actividades agrícolas por arrastre de nutrientes, insecticidas y herbicidas.	Ríos altamente contaminados, con emisiones de olores desagradables, pérdida de ictiofauna, invertebrados acuáticos y flora riparia. Fuente de enfermedades gastrointestinales y desaprovechamiento del recurso hídrico.	Cuenca baja.	Ampliación de la red de colectores de aguas negras y red de aguas pluviales. Construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. Restauración ecológica de los ríos de la cuenca.
Escasez de agua potable . El 22% de la población dentro de la cuenca no tiene acceso adecuado al agua (Bencala <i>et al.</i> , 2006). El 33% de las viviendas al interior de la cuenca no cuentan con agua entubada (Estrada <i>et al.</i> , 2013).	Subutilización del recurso a través de manantiales y pozos profundos por falta de infraestructura adecuada. Desperdicio del recurso proveniente de la precipitación.	Cuatro de los cinco municipios que integran la cuenca están clasificados como de alta marginación.	Toda la cuenca.	Mejorar la eficiencia técnica en el manejo de manantiales y pozos profundos. Incrementar la red de agua entubada. Mejorar los sistemas de potabilización de agua. Desarrollar sistemas de captación de agua pluvial y sistemas de acueductos comunitarios.
Desecación y relleno de humedales . Se estima que entre 1950 y 2000 ha desaparecido el 70% de este ecosistema (Velázquez y Schmitter, 2004).	Crecimiento urbano e infraestructura comercial.	Pérdida de biodiversidad local, cambios en el micro clima y mayor riesgo de inundaciones.	Cuenca baja.	Rescate y restauración de espacios de humedales aún no fuertemente impactados. Respeto a las zonas decretadas de conservación, y diseño e implementación de un plan de manejo para estas zonas.
Riesgos de inundaciones . La ciudad de San Cristóbal ha sido afectada por 12 inundaciones de 1973 a 2005 por causa de huracanes (Montoya <i>et al.</i> , 2008).	Relleno de zonas de humedales y asentamientos urbanos inadecuados. Precipitaciones pluviales más intensas y menor área de infiltración por desarrollo urbano.	Lesiones, enfermedades y pérdidas económicas en las poblaciones humanas, acentuando la vulnerabilidad y la pobreza.	Cuenca Baja.	Rescate y restauración de espacios de humedales aún no fuertemente impactados. Restauración ecológica de los ríos de la cuenca, con énfasis en el desazolve. Reordenamiento territorial.

Tabla 5. Parametrización del modelo SWAT

Parámetro	Consideraciones y supuestos
Clima	Se ocuparon las series diarias de la estación meteorológica 167-925 de Global Weather Data for SWAT para el período del 01/Enero/1984 al 31/Julio/2014.
Suelo	Se ocupó la base HWSO de la FAO con la que se determinaron dos tipos de suelo para la zona de estudio, Acrisol y Luvisol con profundidades máximas de 300 cm y materia orgánica menor al 7% (Figura 4).
Cobertura vegetal	Con base en la cartografía de vegetación y uso del suelo del Inventario Nacional Forestal (SEMARNAT-UNAM, 2000) se reclasificó el uso del suelo en 6 clases ocupadas por SWAT: agricultura (CORN), bosques de encinos (FRSD), bosques de pinos (FRST), bosques de pino-encino y mesófilos (FRSE), pastizales (PAST) y áreas urbanas (URBN) (Figura 5).
Cambio climático	Concentración de CO ₂ = 650 p. p. m., incremento de la temperatura media anual +1.6° C y reducción de la precipitación mensual de -10.5 mm.

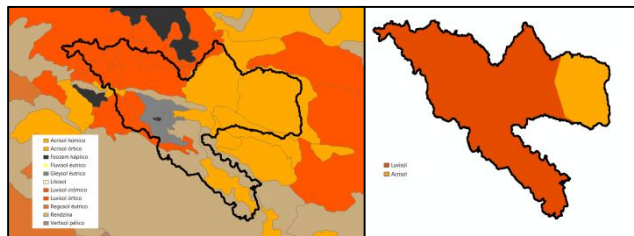


Figura 4. Suelos de la cuenca y suelos del modelo diseñado en SWAT.

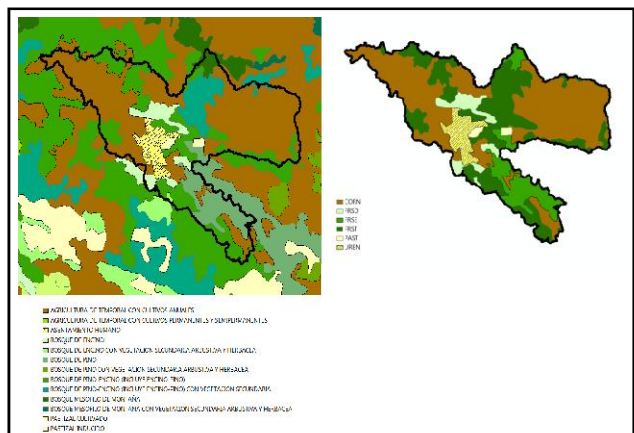


Figura 5. Vegetación de la cuenca y vegetación del modelo diseñado en SWAT.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de simulación en SWAT se ejecutó tanto en el escenario actual (Figura 6) como en el escenario de cambio climático (Figura 7). Al comparar ambos resultados se observa que, ante un escenario de cambio climático, cuantitativamente hay diferencias, se esperaría una reducción de la escorrentía superficial del orden del 16%, una reducción en la evaporación y evapotranspiración del 9% y también una reducción de la recarga del acuífero en un 6%; sin embargo, cualitativamente la cuenca se mantiene como excedentaria con escorrentías probablemente excesivas.

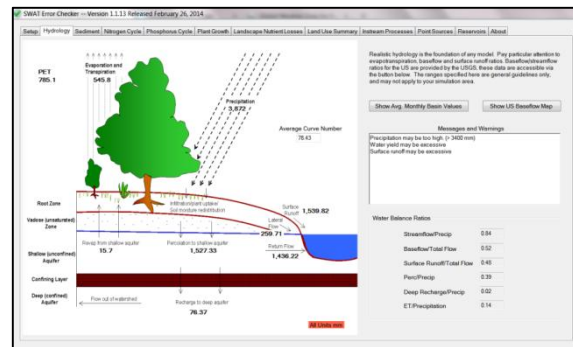


Figura 6. Resultado del balance hídrico del modelo de la cuenca Valle de Jovel simulado para el escenario actual.

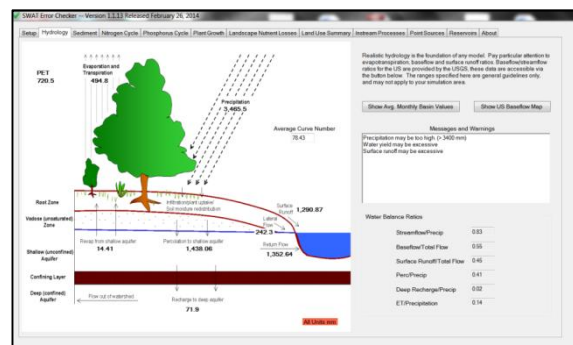


Figura 7. Resultado del balance hídrico del modelo de la cuenca Valle de Jovel simulado para el escenario de cambio climático.

La proyección de una reducción en la escorrentía superficial se podría interpretar como un efecto positivo del cambio climático, pues reduce en cierta medida los riesgos de inundaciones y pérdida de suelo (Montoya *et al.*, 2008; Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011). Sin embargo, la reducción proyectada de evapotranspiración

indicaría una reducción en la productividad primaria neta de los ecosistemas y agroecosistemas de la cuenca, lo que significa menor captura de CO₂ en bosques y humedales, y una reducción en los rendimientos agrícolas (Magrin, 2011). De igual manera, la reducción proyectada en la recarga del acuífero sería un impacto adverso del cambio climático, quizás el más significativo si se toma en cuenta que dentro de la cuenca la mayor parte de la población, y sobre todo de las zonas urbanas, cubren su demanda de agua potable de los acuíferos y no de la escorrentía superficial, pues ésta es contaminada por las aguas servidas que genera la misma población (Estrada *et al.*, 2013). Una reducción de la recarga del acuífero del 6%, y en el supuesto de un aprovechamiento del recurso hídrico sin cambios (algo que raramente sucede pues la tendencia indica un incremento) en un periodo de 15 años más o menos se tendrían serios problemas de abastecimiento de agua potable, debido al mal manejo del recurso que en teoría es excedente dentro de esta cuenca.

Ante este escenario, los humedales de montaña son el ecosistema con riesgo alto de desaparecer, ya que dependen directamente de los escurrimientos superficiales de agua. Además los humedales son ecosistemas muy vulnerables ante la crisis de la actual civilización, la cual está repercutiendo sensiblemente en la degradación paulatina de sus componentes y alteración de su funcionamiento; los problemas más importantes que enfrentan estos ecosistemas y que se verían exacerbados con la proyección de cambio climático modelado son: La expansión de la agricultura y ganadería que reemplaza la vegetación natural por especies introducidas, compacta la tierra impidiendo la infiltración del agua hacia el subsuelo y contamina por el uso inmoderado agroquímicos. La sobreexplotación de los recursos por aprovechamiento excesivo de la vida animal y vegetal ocasionando la disminución y la extinción local de ciertas especies y la extracción excesiva del agua por diversos actores locales y la presencia de una industria trasnacional (García, 2005). La contaminación urbana, dado que muchas áreas de humedales son receptoras de basura y desechos urbanos e industriales, ocasionan un serio deterioro de estos ecosistemas. El

desarrollo de infraestructura, que en el caso de San Cristóbal de Las Casas, en la última década se ha presentado un acelerado y desordenado crecimiento urbano, que ha provocado el cambio de uso del suelo, el relleno de humedales, la contaminación de arroyos, la deforestación de bosques y la extracción del material pétreo (Figuroa-Jáuregui *et al.*, 2011). Por último, la fragmentación y pérdida del ecosistema.

Es necesario subrayar la estrecha relación que tiene este ecosistema y los factores del clima. Los humedales ayudan a regular las condiciones locales del clima, pues el desecamiento de áreas que se inundan contribuye a la disminución de humedad ambiental y aumenta la variación climática, produciendo días muy cálidos y noches muy frías. Los humedales también juegan un papel muy importante dentro del cambio climático global, por un lado ayudan a disminuir los efectos del cambio climático, ya que se estima que estos ecosistemas pueden capturar hasta el 40% del carbono atmosférico gracias a su alta productividad primaria neta. Es así, que sirven de importantes sumideros de carbono y liberación de oxígeno a través de la fotosíntesis (López *et al.*, 2008). Sin embargo pueden jugar un papel muy perverso, pues la desecación de un humedal se traduce en la liberación sobretodo de metano, el cual tiene un potencial de calentamiento 21 veces más que el bióxido de carbono (Magrin, 2011) desencadenando un círculo vicioso entre aumento de gases de efecto invernadero, mayor calentamiento ambiental y desecación de los reductos de humedales en el Valle de Jovel.

Limitaciones del modelo generado.

Es importante señalar que el modelo de la cuenca Valle de Jovel generado mediante SWAT tiene algunas limitaciones debido a la parametrización y a los supuestos que todo modelo matemático de forma inherente conlleva. En primer lugar, no se contó con información meteorológica de las estaciones oficiales dentro de la cuenca, el modelo podría mejorarse con dichos datos y un análisis de calidad de los mismos.

En segundo lugar, el modelo se limitó a dos tipos de suelo para toda la cuenca, aunque sabemos que se tienen principalmente cuatro tipos, sin embargo no se contaba con la información necesaria para parametrizar los cuatro tipos de suelos en SWAT.

En tercer término, la reclasificación de la cobertura vegetal en SWAT resulta limitada, debido a que SWAT tiene una amplia y completa variedad de tipos de cobertura para cultivos agrícolas, pero los inventarios de vegetación en México no los separan, por tanto todos los cultivos se agruparon en el tipo que representa la mayor cobertura agrícola en la región. Por el contrario los inventarios de vegetación en México son muy cuidadosos en diferenciar distintos tipos de bosques y selvas, sin embargo las categorías ocupadas por SWAT son muy generales. Aunado a esto, en el escenario de cambio climático se asume que se mantiene sin cambios el tipo de cobertura del suelo. Finalmente, debido a que no se cuentan con datos históricos del caudal de los ríos que conforman la cuenca, no es posible realizar la calibración y validación del modelo.

CONCLUSIONES

A pesar de sus limitaciones, el modelo diseñado tiene la bondad de brindar proyecciones que ilustran la situación de la cuenca y activan el principio precautorio ante escenarios poco alentadores, la evidencia empírica y la convivencia diaria dentro de la cuenca no dista mucho de lo que nos revela el modelo, tampoco la lógica y el sentido común contradicen el dictamen: es urgente iniciar un proceso de gestión sustentable del recurso hídrico dentro de la cuenca, que contemple el saneamiento y restauración de los ríos, arroyos y humedales, la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales al menos para cada una de las dos zonas urbanas de mayor población, Chamula y San Cristóbal. Ambas acciones implican un sistema adecuado de drenajes de aguas servidas y un sistema de alcantarillado de aguas pluviales, el primero dirigido a las plantas de tratamiento y el segundo a los ríos. Acciones paralelas

indispensables serían una planta de manejo de residuos sólidos y un entierro sanitario, la restauración de bosques en las zonas de recarga hídrica para evitar en lo posible el desgaste de los acuíferos, la reconversión productiva hacia sistemas agroecológicos con bajo uso de insumos industriales, y es necesario definir una política eficiente para el aprovechamiento de material pétreo sin detrimento de los bosques.

Finalmente, estas acciones deberán cristalizar un modelo de gobernanza del agua en la cuenca que permita consensar entre todos los actores involucrados aspectos como: la necesidad de una amplia participación ciudadana en los sistemas operadores de agua potable y la elaboración de políticas sobre cuotas y concesiones, el carácter público del agua como un derecho humano fundamental y la imposibilidad de privatizar los servicios de abastecimiento para consumo humano.

Agradecimientos

La investigación se realizó como parte central de la estancia del primer autor en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) para lo cual recibió financiamiento y por tanto se agradece en todo lo que vale al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Programa de Estancias Cortas al Extranjero de la Dirección de Desarrollo Científico, y a la Secretaría de Educación Pública (SEP) a través del Programa para el Desarrollo Profesional Docente de la Dirección de Superación Académica. También se agradece al CATIE y en específico al Grupo Académico de Cambio Climático y Cuencas por todas las facilidades para realizar la estancia de investigación.

REFERENCIAS

Bencala, K., Hains, R., Liu, E., Nogueira, T., Segan, D. & Stevens, S. (2006) *Desarrollo de un plan de administración sostenible para la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México*. Bren School of Environmental Science and Management. Tesis de Maestría. University of California Santa Barbara. 157 p.

Cayuela, L. (2006) *Deforestación y fragmentación de los bosques montanos de Chiapas: Efectos en la diversidad*. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.

CRU (Climatic Research Unity) (2012) Base de datos climáticos CRU versión TS3.1. Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad del Anglia Oriental. En: <http://www.cru.uea.ac.uk> Fecha de consulta 20 de agosto de 2012.

Espíritu, G. (1998) *Evaluación de la disponibilidad de agua mediante el análisis geográfico en la Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas*. Tesis de Maestría. ECOSUR. 33p.

Estrada, J., Trucíos, R., Villanueva, J., Cerano, J. & Constante, V. (2013) *Manejo sustentable de los recursos naturales en la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas*. INIFAP. México. 180 p.

Faustino, J. & Watler, W. (2014) *Manejo de Cuencas Hidrográficas y Uso del Suelo*. CATIE. Costa Rica. 237 p.

Figuerola-Jáuregui, L., Ibáñez-Castillo, A., Arteaga-Ramírez, R., Arellano-Monterrosas, L. & Vázquez-Peña, M. (2011) “Cambio de Uso de Suelo en la Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, México”. *Agrociencia* [en línea] vol. 45. En: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n5/v45n5a1.pdf> (Consultado: 26/08/2014).

Galindo-Jaimes, L., González-Espinosa, M., Quintana-Ascencio, P. & García-Barrios, L. (2002) Tree composition and structure in disturbed stands with varying dominance by *Pinus* spp. in the highlands of Chiapas, México. *En Plant Ecology* 162:259-272.

Galindo-Jaimes, L., Martínez Icó, M., López Carmona, M., Camacho Cruz, A., Ramírez Marcial, N. & Santiago-Lastra, J. (2008) *Humedales de Montaña en Chiapas: Reconocimiento de la flora y avifauna asociada*, Biodiversidad: Conservación y Restauración, A. C.- El Colegio de la Frontera Sur, Chiapas, México. 63 p.

García, A. (2005) *La cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: entre la gestión local y la nacional*. En: Vargas S, Mollard E (eds). *Problemas Socio-económicos y Experiencias Organizativas en las Cuencas de*

México. IMTA, IRD. Cuernavaca, Morelos, México. pp: 219-244.

García, A. & Valencia, E. (2010) “Delimitación y codificación de cuencas bajo la metodología de Otto Pfafstetter mediante Sistemas de Información Geográfica: Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México”. Ponencia oral en: *Foro Cuencas en Chiapas: la construcción de utopías en cascada*. Noviembre de 2010.

González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N. & Ruiz-Montoya, L. (2005) *Diversidad biológica en Chiapas*. Plaza y Valdés, México D. F. 484 p.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2014) “Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”. En: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html> Fecha de consulta 18 de febrero de 2014.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2013) “México en cifras: Estadística, Geografía y Prontuario de información geográfica municipal”. En: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> Fecha de consulta 20 de agosto de 2014.

Leff, E. (2008) *Discursos Sustentables*. Siglo XXI editores, S. A. de C. V. México. D. F. 272 p.

López, M., Santiago, J., Camacho, A., Galindo, L. & Martínez, M. (2008) “Los humedales de montaña de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas”, *Gaceta UNICH* 3(11), pp. 8-10

Magrin, G. (2011) “Impactos y vulnerabilidad al Cambio Climático en el sector agropecuario”, ponencia, Curso de formación de formadores impactos del cambio climático y medidas de adaptación en los sectores forestales y agrarios, 16-19 de agosto, Centro de Formación AECID, Bolivia.

Montoya, G., Hernández, J. Castillo, M., Díaz, D. & Velasco, A. (2008) “Vulnerabilidad y riesgo por inundación en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas”. En: *Estudios demográficos y urbanos*. Vol. 23 Núm. 1 (67): 83-122

Moss, R., Edmons, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., van Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J. & Wilbanks, T. (2010) "The next generation of scenarios for climate change research and assessment". En: *Nature* 463: 747-755.

Ochoa-Gaona, S. & González-Espinosa, M. (2000) "Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, México". En: *Appl. Geogr.* 20:17-42

Periódico Oficial. Tomo III. Número 78. Órgano de difusión oficial del estado libre y soberano de Chiapas, Secretaría de Gobierno de Chiapas, 01 de febrero de 2008.

Ramírez-Marcial, N., Camacho-Cruz, A. & González-Espinosa, M. (2005) "Potencial florístico para la restauración de bosques en Los Altos y Montañas del Norte de Chiapas". En: González-Espinosa M, Ramírez-Marcial N, Ruiz-Montoya L, (Eds.) *Diversidad Biológica de Chiapas*. El Colegio de la Frontera Sur. México.

Ríos, N., Imbach, P. & Argeñal, J. (2014) "Impacto del cambio climático en la producción de agua para la agricultura y consumo humano en la subcuenca del río Guacerique, Río Choluteca, Honduras". Cartel científico presentado en: Taller de resultados de los proyectos CASCADE y PNUMA. Tegucigalpa, Honduras.

Santiago-Lastra, J. & Perales, H. (2007) "Producción campesina con alto uso de insumos industriales: El cultivo de repollo (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) en Los Altos de Chiapas". En: *Ra Ximhai* 3(2): 481-507

Santiago-Lastra, J., López, M., Espinoza, M., Moshán, M. & Gómez, J. (2012) "Problemas Ambientales en Chiapas". En: *Recursos Naturales y Contaminación Ambiental*. Martínez, R.; Ramírez, B. y G. Rojo (coordinadores). Universidad Autónoma Indígena de México. ISBN: 933-432-987-0 pp: 297-328

Santiago-Lastra, J. (2015) *Cambios Ambientales en Chiapas: Doce testimonios del medio rural*. Universidad Intercultural de Chiapas. México. 123 p.

Schenerock, A. (2014) "La organización y participación social y ciudadana en el cuidado ambiental de la Cuenca del Valle de Jovel: logros, dificultades y retos". En: *Cuencas en Chiapas: la construcción de utopías en cascada*. Kauffer, E. (coordinadora). CIESAS - RISAF. ISBN: 978-607-486-285-0.

SEMAHN (Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural) (2012) "Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de San Cristóbal de Las Casas. Gobierno del Estado de Chiapas". En: <http://www.bitacora.semahn.chiapas.gob.mx/oet/Oet9> Fecha de consulta 12 de febrero de 2014.

SEMARNAT-UNAM (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Universidad Nacional Autónoma de México) (2000) *Resultados del inventario forestal nacional 2000*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (2014) En: <http://swat.tamu.edu/> Fecha de consulta 15 de septiembre de 2014.

Valverde, A. (2014) "Criterios de Gobernanza Ambiental: Hacia la construcción de territorios climáticamente inteligentes". En: *Gestión Sostenible y Equitativa del Recurso Agua: Adaptación a las variables climáticas*. CATIE. Bolivia. 26 p.

Velázquez, E. (2001) Conservation status of *Profundulus hildebrandi* Miller (Teleostei: Profundulidae) in the face of urban growth in Chiapas, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México. 24 p.

Velázquez, E. & Schmitter, J. (2004) Conservation status of *Profundulus hildebrandi* Miller (Teleostei: Profundulidae) in the face of urban growth in Chiapas, Mexico. En: *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst* 14: 201-209.