

V E R A C R U Z
Biblioteca del especialista



Las inundaciones de 2010 en Veracruz

Memoria social y medio físico

Adalberto Tejeda Martínez
Coordinador

Liliana Betancourt Trevedhan
Coordinadora asociada

Gobernador del Estado de Veracruz / Dr. Javier Duarte de Ochoa

Secretario de Educación
de Veracruz
Lic. Adolfo Mota Hernández

Director General del Consejo Veracruzano
de Ciencia y Tecnología
Dr. Víctor Manuel Álvarez Romero

Responsable del Programa Editorial del
Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología
Lic. Claudia Díaz Rivera

Responsable del Programa de Apropiación
Social de la Ciencia del Consejo Veracruzano
de Ciencia y Tecnología
Lic. Humberto Carreras Garibay

Rector de la Universidad Veracruzana
Dr. Raúl Arias Covillo

Secretario Académico
de la Universidad Veracruzana
Dr. Porfirio Castillo Castilla

Secretario de Administración y Finanzas
de la Universidad Veracruzana
Lic. Víctor Aguilar Pizarro

Director General de Investigaciones
de la Universidad Veracruzana
Dr. César Ignacio Borstlein Guevara

La edición de este libro se realizó gracias al apoyo del Fondo Mixto de Ciencia y Tecnología, integrado por el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave y el Conacyt, para dar a conocer los resultados de investigaciones financiadas por dicho fondo en las áreas relacionadas con inundaciones en el estado de Veracruz.

Coordinadora general de la colección La Ciencia en Veracruz / Martha Poblett Miranda

Diseño editorial / Humberto Bera

Corrección de estilo / Ana María Carbonell León y Ricardo Porcia Peña

Material manuscrito / Juana Zepeda Díaz, Gloria Cuevas Guillaumen y Uziel Sando Marnota

Primera edición

D.F. © 2012. Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico

Esta obra es propiedad intelectual de sus autores, y los derechos de publicación han sido legalmente aceptados y autorizados.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio sin autorización expresa y por escrito de su legítimo titular de derechos.

ISBN Colección La Ciencia en Veracruz: 978-607-9090-00-5

ISBN Las inundaciones de 2010 en Veracruz. Memoria social y medio físico: 978-607-9090-13-5

Impreso en México / Printed in Mexico



PRÓLOGO	6
INTRODUCCIÓN	18
MEMORIA	
- Memorias del agua: Historia oral de las inundaciones de la cuenca del Papalnapan	44
- Los ciclones tropicales en Veracruz y sinopsis del huracán Karl	78
EL MEDIO FÍSICO	
- Lluvias extremas en Veracruz en 2010 y su relación con la variabilidad natural del clima	120
- Escurrimiento generado por el huracán Karl: una primera estimación	152
- Escenarios propiciatorios de las inundaciones en la zona costera de Veracruz: el caso de la cuenca del río Jamapa	176
- Variaciones del nivel estático registradas en la parte baja del río Coatzacoalcos y su relación con las precipitaciones intensas precursoras de inundaciones recurrentes	198
- La restauración ecológica como estrategia para la reducción del riesgo de desastre ante inundaciones. Estudio de caso: La cuenca del río Coatzacoalcos	216

La restauración ecológica como estrategia para la reducción del riesgo de desastre ante inundaciones. Estudio de caso: la cuenca del río Coatzacoalcos

Samaria Armenta Montero
Juan Carlos López Acosta
Ernesto Rodríguez Luna
Edward Allan Ellis
Silvia del Amo Rodríguez
Arturo Gómez Pompa
María Cristina Mac Swiney González
Anibal Niembro Rocas
Odilón Sánchez Sánchez
Mario Vázquez Torres
Noé Velázquez Rosas

INTRODUCCIÓN

Actualmente el impacto de las actividades humanas sobre la calidad del ambiente y los recursos naturales es un tema prioritario en la agenda de los gobiernos. A nivel mundial, la continua devastación de los ecosistemas terrestres está asociada al incremento de las consecuencias negativas de los fenómenos meteorológicos extremos (Vitousek, 1997; Balvanera *et al.*, 2009). Esto es relevante en países como México que, debido a su ubicación geográfica, está expuesto al impacto de fenómenos meteorológicos como ciclones tropicales y lluvias severas, causantes de deslizos e inundaciones, que han aumentado en frecuencia e intensidad, así como en sus impactos negativos que vulneran el bienestar de las poblaciones humanas (Chapin *et al.*, 2000; Conabio, 2008).

Acciones como el cambio de uso de suelo (principalmente la deforestación) son el eje de cambios radicales en la calidad de los servicios ambientales importantes para el desarrollo humano. Esto determina la pérdida de poblaciones de plantas y animales, modificando ciclos biogeoquímicos que regulan en gran medida el comportamiento climático e incrementan el riesgo de inundaciones cuando existen eventos meteorológicos extremos.

El cambio en la cobertura de los ecosistemas por deforestación, además de provocar una sustancial pérdida de su biodiversidad asociada, trae consigo una pérdida de los servicios ecosistémicos (MENA, 2005). Estos servicios han sido catalogados como de provisión (alimento, materias primas), soporte (formación de suelo, producción primaria), culturales (religiosos, recreación), de regulación (del

clima, control de enfermedades); servicios que, de ser deteriorados, afectan directamente la calidad de vida de las poblaciones humanas (Chapin *et al.*, 2000; Gómez, 2004).

Si bien todos los servicios ambientales son fundamentales para el desarrollo y bienestar humanos, actualmente se ha puesto énfasis en el estudio de los servicios de regulación, los cuales incluyen procesos ecosistémicos complejos que regulan las condiciones del ambiente –incluyendo el clima, la erosión de los suelos y la capacidad de los ecosistemas de mitigar los eventos de inundación u otros desastres (Manson, 2004; Balvanera *et al.*, 2009)–. La atención mundial se ha enfocado en este tipo de servicios, ya que los impactos negativos de los fenómenos meteorológicos se han magnificado, ocasionando grandes desastres con cuantiosas pérdidas económicas y vidas humanas (Balvanera *et al.*, 2009). De 1995 a 2005, en el mundo se ha incrementado un 300% la incidencia de los desastres, comparado con la década de los sesenta; y los costos económicos de estos desastres han crecido en un 900% (MEA, 2005). El deterioro ambiental en México es un tema central de la agenda asociada a la conservación y recuperación del capital natural.⁴ En términos económicos, se ha calculado que los costos monetarios de este deterioro (incluyendo los desastres) representaron un promedio anual de 10.36% del PIB entre 1996 y 2003. En términos sociales, la factura es aún más costosa, cuando se consideran la pérdida de vidas a causa de los desastres, así como la disminución de la calidad de vida y el bienestar social de la población.

⁴ Acuerdo de recursos naturales y servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas que generan un flujo de bienes y servicios útiles a costa natural a lo largo del tiempo (Costanza y Daly, 1992).

Esta realidad pone de manifiesto la necesidad de asegurar el mantenimiento y la recuperación de la provisión de servicios ambientales en el mediano y largo plazos (Conabio-Semarnat, 2009).

Se ha planteado que el incremento en la frecuencia de las inundaciones está asociado a los cambios en los patrones de precipitación, ocasionados en parte por el cambio climático global o la variabilidad climática interanual. Sin embargo, el incremento del impacto negativo de estos desastres en las poblaciones humanas tiene un origen multifactorial (Manson *et al.*, 2009). Es por esto que, para analizar las consecuencias negativas de eventos extremos, es necesario considerar las distintas estrategias del uso de suelo, el papel de los ecosistemas naturales para regular la cantidad y calidad del agua y sus capacidades intrínsecas para responder a éstos, así como los modelos de desarrollo económico en las zonas altas y bajas de las cuencas hidrológicas (Braijnzeel, 2001; Naiman y Décamps, 1997; Lara *et al.*, 1998).

En México, los efectos negativos de los desastres han quedado claros en las inundaciones registradas en 2005 en Chiapas, en el 2007 en Tabasco y más recientemente en el 2010 en Veracruz. Estas catástrofes ocasionaron millonarias pérdidas, miles de damnificados y, lamentablemente, la pérdida de muchas vidas humanas. Para el caso de Veracruz, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2005) reportó que en el periodo comprendido entre 1993 y 2000 se perdió el 4.8% de la vegetación natural. Ellis y colaboradores (2010) registraron que en el estado de Veracruz existe una superficie deforestada de 340 932 ha, de ésta sólo el 26% corresponde a vegetación natural, y el 8.6% está cubierto por vegetación conservada.

Por ello, el paisaje veracruzano está caracterizado por pequeños fragmentos de vegetación primaria inmersos dentro de amplias zonas de vegetación secundaria, pastizales, agrícolas o urbanas. La transformación del paisaje ha sido una constante en Veracruz y lo ha ubicado como el quinto estado con mayor deforestación a nivel nacional (Giddings *et al.*, 1996). Una de las zonas con mayor deforestación ha sido la cuenca del río Jamapa, que entre los años de 1993 y 2002 perdió casi 78 000 ha. De igual manera, las cuencas de los ríos Papaloapan, Pámlico y Coatzacoalcos perdieron en el mismo periodo 57 862, 51 525 y 40 397 ha, respectivamente. Los principales factores que modulan la deforestación y pérdida de vegetación natural en Veracruz han sido la expansión de actividades agropecuarias, la construcción de infraestructura vial y la urbanización provocada por el crecimiento poblacional (Ellis *et al.*, 2010).

Asumido a este deterioro del capital natural, la ubicación del estado de Veracruz en una región intertropical lo hace especialmente vulnerable a los embates de ciclones tropicales con alto potencial de afectación humana, ya que tan sólo en su zona costera albergaba hace una década una población de 6.7 millones de habitantes (Cenapred, 2001). Un ejemplo de impactos y daños se reportó para el huracán *Diana*, que en 1990 arrojó un saldo de pérdidas por más de 250 000 millones de pesos en Veracruz y 50 000 damnificados (Cenapred, 2001). El huracán *Karl* en 2010 causó daños en 50 000 viviendas de 94 municipios y las pérdidas económicas se estimaron en 70 000 millones de pesos (comunicado de prensa del gobernador de Veracruz, 26/09/10). Asociado a estos fenómenos, las inundaciones y deslaves son comunes dentro del estado.

Por ejemplo, entre 1950 y 1988 Veracruz fue el estado que más eventos de inundaciones tuvo, con un total de 417, cuyas consecuencias fueron los daños de los bienes materiales, cultivos y poblaciones de fauna y flora, así como la muerte de personas, la erosión del suelo y el depósito de sedimentos.

Entre los principales factores que condicionan a las inundaciones están la distribución espacial de la lluvia, la topografía, las características físicas de los arroyos y ríos, las formas y longitudes de los cauces, el tipo de suelo, la pendiente del terreno y, de manera particular y contemporánea, la cobertura vegetal y el cambio de uso del suelo, así como una urbanización descontrolada (Cenapred, 2001).

Muchos de estos graves problemas ambientales y sociales surgen del inadecuado uso y conservación de los recursos naturales, además de la falta de aplicación de un manejo integrado de cuencas en los procesos y políticas de desarrollo regional. Actualmente, la gestión sustentable a escala de las cuencas hidrográficas es una necesidad fundamental para resolver los problemas hídricos, ecológicos, económicos y sociales, los cuales a su vez tienen su origen en factores directos e indirectos de transformación antropogénica. Hay que tomar en cuenta que las cuencas hidrográficas son sistemas abiertos, con entradas y salidas de energía y materia, influenciadas por factores físicos, biológicos o socioeconómicos (Moreno y Renner, 2007), siendo el ciclo del agua uno de los más alterados en la actualidad.

Como se ha venido insistiendo en este documento, los problemas ecológicos a nivel de cuenca son ocasionados principalmente por el cambio de uso del suelo, la sustitución de cubierta forestal por áreas para uso agrícola y/o pecuario, la tala

inmoderada, la sobreexplotación de los mantos acuíferos y el uso irracional de pesticidas (Manson, 2004). En particular, los bosques influyen directamente sobre los procesos hidrológicos, no sólo en lo que se refiere a la captación del agua de lluvia, sino también en cuanto a que pueden modificar los patrones de precipitación a través de la regulación del clima regional (Manson, 2004). La remoción de la cobertura boscosa y su remplazo por casi cualquier otro uso de suelo puede reducir la tasa de evapotranspiración, aumentar la escorrentía superficial y la pérdida de suelos. Los sedimentos son transportados por escorrentía superficial cuenca abajo, propiciando el azolve y la contaminación de cuerpos de agua y, por ende, el incremento del riesgo por inundaciones.

No obstante, el estado actual de la cobertura vegetal y de las cuencas en México y especialmente en Veracruz, no es producto de un cambio repentino, sino de una historia de transformación territorial y de percepción de los recursos naturales en los paisajes regionales, por lo que es importante reflexionar sobre el estado actual de los recursos naturales como el resultado de una interacción múltiple entre aspectos sociales, culturales y económicos que modulan la percepción de la naturaleza y su aprovechamiento. Esta interacción de factores no es estática en el tiempo, sino que varía con las circunstancias históricas. Por lo tanto, el efecto antropogénico adquiere un impacto diferencial de acuerdo con una época histórica determinada, lo cual influye directamente sobre el balance de las transacciones de incremento o reducción del bienestar humano. Consecuentemente, el estado actual de las inundaciones, tiene fuertes efectos sinérgicos con la transformación de la cobertura vegetal y

requiere de una perspectiva integral que nos ayude a interpretar los factores de cambio que han modulado al paisaje veracruzano. Esta interpretación ayuda a desarrollar propuestas concretas que garanticen la persistencia del capital natural y el bienestar social.

Como un ejercicio de esta integración de concepciones, este documento intenta integrar tres tópicos complementarios: 1) una visión histórica de la transformación de los recursos naturales, tomando como ejemplo el cambio histórico del Puerto de Veracruz; 2) un estudio que aborde la problemática del cambio de uso de suelo y su impacto en el paisaje de la cuenca del río Coatzacoalcos, que realice un modelo del comportamiento hidrológico y analice la vulnerabilidad a los fenómenos hidrometeorológicos, y 3) una visión integradora de la recuperación de servicios ecosistémicos a través de la restauración ecológica desde la cuenca alta en la zona del Uxpanapa, lo cual contribuiría a disminuir y/o mitigar los desastres en la parte de la cuenca baja.

Una visión histórica de la transformación de los recursos naturales del territorio veracruzano

Las poblaciones humanas siempre han dependido de sus entornos naturales para subsistir. Para ello, a lo largo de la historia de la humanidad se han practicado distintas estrategias de ocupación y transformación territorial. Desde primitivas formas de recolecta vegetal y cacería hasta las modernas urbanizaciones y desarrollos agroindustriales, cada una de ellas con diferente impacto

ambiental. De acuerdo con el planteamiento de McNeill (2003), la moderna historia medioambiental del planeta y la historia socioeconómica de la humanidad sólo adquieren sentido si se contemplan conjuntamente.

Como ejemplo tomaremos la transformación territorial del Puerto de Veracruz. Al reflexionar sobre la imagen del Puerto de Veracruz en el año 1864, tal como lo apreciaba Casimiro Castro desde la perspectiva que le daba su posición en un globo acrostático, podemos reconocer al Veracruz amarrado como defensa al ataque de los piratas. En ese momento Veracruz tenía más de tres siglos de haberse consolidado como puerto clave en el intercambio comercial entre España y la Nueva España, primero, y el México independiente, después. La colonización del sitio exigió una transformación territorial que paulatinamente hizo desaparecer los ecosistemas costeros (dunas y lagunas, entre otros) que caracterizaban fisiogeográficamente al paisaje natural. En aquel momento, el desafío ambiental lo representaban los pantanos a los que se asociaba el origen de distintas dolencias, entre ellas la fiebre amarilla o el vómito negro, lo que ocasionó que durante la Colonia se le llamara a la ciudad de Veracruz "El cementerio de españoles". Como medidas sanitarias se secaron los pantanos y se derribaron las murallas del puerto. Ese cambio radical en la configuración territorial fue producto de una problemática temporal, y tuvo como consecuencia la pérdida de elementos del sistema lagunar veracruzano que actualmente está influenciando la dinámica hídrica de la zona (Rodríguez-Luna *et al.*, 2011).

Algunos registros históricos reportaban la existencia de más de 200 lagunas, de las cuales



actualmente sólo se registran 18 (Sarabia, 2004). Es importante hacer notar que, dada su geomorfología, la principal característica de estas lagunas veracruzanas es la calificación de "caminantes", es decir, efímeras, ya que aparecían y desaparecían. Por esta razón, es difícil saber su número exacto, ya que se formaban entre las crestas de los médanos y su agua era suministrada por el manto freático y pluvial; el viento, al llegar, levantaba la arena de los médanos y entonces brotaban las lagunas. A principios del siglo XX, diversas actividades industriales, como la apertura de Astilleros de Veracruz, en 1902; la fábrica de acero Tenaris (antes Tamsa), en 1953, y la firma del convenio trilateral entre México, Estados Unidos y Canadá, en 1993, han reconfigurado en mayor medida al sistema lagunar, ya que atrajeron gente de otros

■
Perspectiva aérea del
Puerto de Veracruz,
1864
Fuente:
Casimiro Castro, 1864

sitios hacia Veracruz donde se necesitaba mano de obra y como consecuencia se incrementó la necesidad del cambio de uso de suelo del municipio (Rodríguez-Luna *et al.*, 2011). Esta profunda transformación del paisaje costero ha ocasionado desequilibrios ecológicos, los que se han acelerado con el crecimiento urbano sin la debida planeación, entre ellos el relleno de las lagunas, lo cual ha provocado la falta de retención del agua de lluvia y por consecuencia escurrimientos mayores hacia la ciudad de Veracruz e inundaciones en las poblaciones circunvecinas (Rodríguez-Luna *et al.*, 2011), predicciones probadas por los eventos catastróficos de 2010.

Al derrumbarse las murallas, la expansión urbana del puerto obligó al secado de arroyos y lagunas, a la remoción de dunas y a una progresiva ganancia de terrenos al mar, estos hechos históricos han moldeado el paisaje del Puerto de Veracruz.

Actualmente se puede reconocer a la fortaleza de San Juan de Ulúa rodeada de las gigantes casacas que requiere el moderno comercio ultramarino. Del Veracruz colonial sólo permanecen algunos vestigios y, lo que fuera un islote, ahora es una porción conectada a tierra firme por terrenos ganados al mar. Asimismo, se advierte que la problemática ambiental contemporánea es distinta a la del paisaje contemplado por Casimiro Castro. En la actualidad estos problemas están relacionados con las inundaciones en la zona conurbada, la destrucción del sistema arrecifal, la contaminación por actividad agroindustrial y urbana, así como un inmenso cambio de áreas de dunas y humedales por desarrollos urbanísticos e industriales. En este escenario se reconoce una problemática de escala global que coincide con la propiamente local y regional.

El desarrollo del Puerto de Veracruz deja ver aún algunas evidencias de su pasado. Las necesidades históricas de sus pobladores ha sido el factor de modulación que ha configurado el paisaje.

Como lo muestra este ejemplo, se puede desarrollar una narrativa histórica de la transformación del territorio veracruzano. En esa historia de la transformación de Veracruz se pueden reconocer distintas formas de entender la relación del hombre con sus entornos naturales, y cómo éste ha modelado los paisajes regionales, de tal modo que para cada región es factible reconocer una superposición de visiones y usos territoriales que da forma a un mosaico que abarca desde ecosistemas naturales hasta los marcadamente antropizados, los cuales imponen el reto de recuperarlos y manejarlos para asegurar el bienestar de las futuras generaciones.

• Cuenca del río Coatzacoalcos: estudio de caso

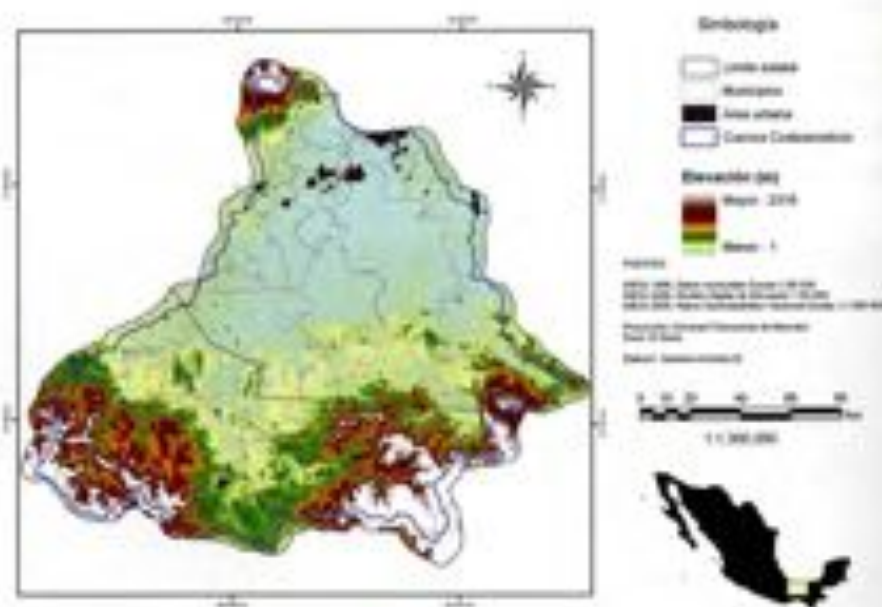
La cuenca del río Coatzacoalcos forma parte de la Región Hidrológica-Administrativa X Golfo Centro

■
Área de carga y
descarga en el Puerto
de Veracruz
Foto:
Emmanuel Soto Pérez,
2009



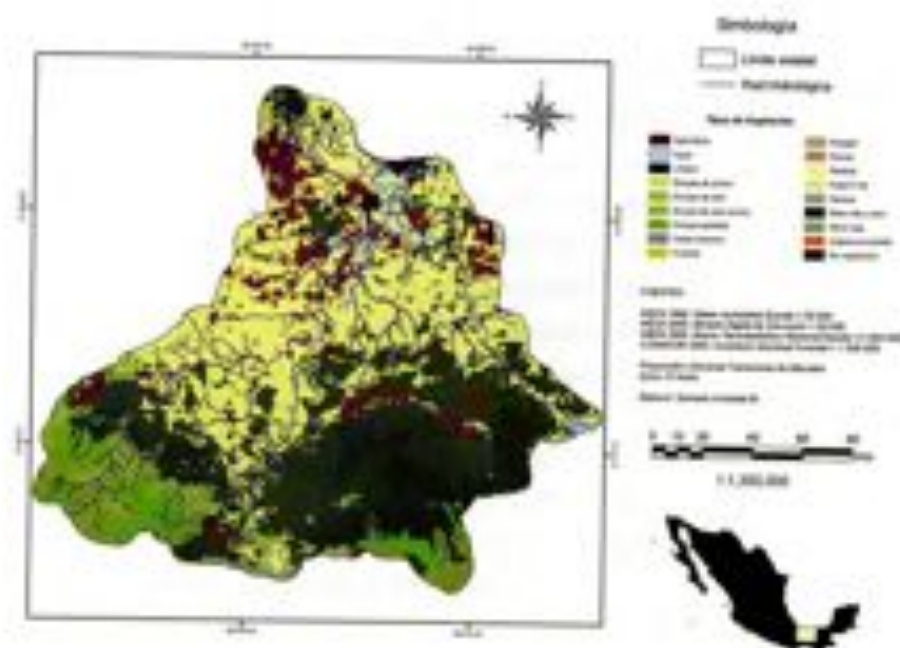
y de la región Hidrológica 29 de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Se encuentra geográficamente entre 16°38' y 18°22' latitud norte, y 94°11' y 95°45' longitud oeste (mapa 49). Tiene un área aproximada de 17 369 km², distribuida entre los estados de Oaxaca y Veracruz (Pereyra y Pérez, 2006). La cuenca abarca 40 municipios, de los cuales 15 pertenecen al estado de Oaxaca y 25 a Veracruz, y tiene una población de 1.3 millones de habitantes. Los municipios que tienen mayor cantidad de habitantes son: Coatzacoalcos, Minatitlán y Cosoleacaque (INEGI, 2005 b). El área presenta altitudes desde el nivel del mar, con un 80% de su superficie menor a los 200 m, pocos lomeríos, y el punto más alto alcanza los 2 100 m en la parte final de la Sierra Madre del Sur (Sierra Norte de Oaxaca) y la parte inicial de la Cordillera Centroamericana (Sierra Atravesada).

Mapa 49
Ubicación de la cuenca del río Coatzacoalcos
Fuente:
Centro de Investigaciones Tropicales, 2011



El sistema hidrográfico del río Coatzacoalcos es el tercero más importante del país por su caudal, después de los sistemas Grijalva-Usumacinta y Papaloapan (Conagua, 2007). El volumen de agua utilizada en la cuenca asciende a 355.2 hm³, de los cuales el 11.5% se obtiene de extracción subterránea y el 88.5% de fuentes superficiales; el 74.8% se destina a actividades industriales, el 24.3% a uso público-urbano, el 0.8% a la agricultura y el 0.1% restante a otros usos (Consejo de Cuenca del río Coatzacoalcos, 2010). El río Coatzacoalcos está constituido por importantes afluentes, entre los que destacan los ríos Uxpanapa, Jaltepec, Coachapa y Calzadas (mapa 50). Los primeros nacen en las sierras que definen el compartimiento del Istmo de Tehuantepec y el último en la Sierra de los Tuxtlas (Pereyra y Pérez, 2006). El clima es cálido húmedo y subhúmedo con lluvias en verano, excepto la

Mapa 50
Tipos de vegetación y la red hidrológica en la cuenca del Coatzacoalcos
Fuente:
Centro de Investigaciones Tropicales, 2011



zona montañosa de Oaxaca, donde es semicálido húmedo. La temperatura promedio anual es mayor a los 26 °C y la precipitación media anual es de 1 700 mm en la planicie costera y de 3 000 mm en la zona del río Uxpanapa.

Los tipos de vegetación presentes, de acuerdo a diversas clasificaciones (Miranda y Hernández, 1963; Rzedowski, 1978; Sousa, 1968), son diez: bosque mesófilo de montaña (2.1%), bosque de pino (1%), bosque de pino-encino (7.9%), encinar (0.1%), selva alta y mediana perennifolia y subperennifolia (26%), selva baja (12.2%), sabana (0.8%), popal-tular (1.4%), manglar y vegetación halófila, además de otros usos como el palmar y plantaciones forestales, como el hule (*Hevea brasiliensis*). El uso de suelo predominante y más extenso son los potreros, con un 38.6% de su superficie, y 7.3% de agricultura (mapa 50).

Extensas áreas del paisaje de la cuenca comprenden potreros, debido a que gran parte de las selvas originales fueron deforestadas severamente desde los años setenta, debido al poblamiento del Valle del Uxpanapa y a programas gubernamentales que promovían erróneamente el desmonte masivo para la agricultura, proyecto que resultó en un rotundo fracaso y ecocidio nacional (Aguilera, 2004). Como muestra de lo que sucede en las selvas mexicanas, Masera y colaboradores (1997) estimaron que este ecosistema cubría alrededor de un 20% de la superficie nacional, pero entre 1976 y 1980 la deforestación anual fue de 160 000 ha/año, y para el año 2000 cambió a 10 800 km² por año, siendo las selvas las más afectadas, y el cambio de uso de suelo como la principal causa de desaparición (Conagua, 2007).

Modelación. Para este ejercicio se desarrolló un modelo y se determinaron las características hidrológicas de la cuenca del río Coatzacoalcos, se evaluaron las relaciones con la cobertura de vegetación y uso del suelo en el paisaje. Para la modelación hidrológica de la cuenca se aplicó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual está basado en características físicas específicas como la topografía, el clima, el tipo de suelo, de vegetación y las prácticas de manejo (Benavides *et al.*, 2008). Este modelo se desarrolló para evaluar el impacto de las prácticas agronómicas sobre la calidad y producción de agua, y sedimentos en cuencas grandes y complejas (Guzmán *et al.*, 2004; Torres *et al.*, 2004). Las características físicas empleadas permiten evaluar los procesos y patrones hidrológicos, y determinar los impactos que pueden ocurrir en una cuenca en relación con las variables y condiciones climatológicas, cambios de cobertura y uso de suelos e incluso distintos tipos de manejo o sistemas agroforestales desarrollados.

Para la caracterización hidrológica, aplicando el modelo SWAT, es necesario integrar datos climatológicos, topográficos, edafológicos, de vegetación y uso del suelo. Adicionalmente, el modelo permite la integración de tipos de manejo e insumos agropecuarios presentes en una cuenca. En este estudio se emplearon los datos climatológicos obtenidos por la Conagua, la red hidrológica georreferenciada del INEGI (1983), datos edafológicos georreferenciados de Conalbio (1995), integrados con datos fisicoquímicos de suelos de la EAO-ISRIC-SICS (1999), el modelo de elevación (90 m) de INEGI (2000), y datos georreferenciados de vegetación y uso de suelo del Inventario Nacional Forestal (Conafor, 2000).

Los datos climatológicos fueron procesados con información de los años 1982 a 2005, proveniente de 15 estaciones climatológicas que se encuentran dentro y alrededor del área analizada. El procesamiento requiere de información de precipitación, temperaturas, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Cabe mencionar que el clima es uno de los elementos más influyentes en el modelo, por lo que su integración es sumamente importante y valiosa. La gráfica 26 muestra el promedio de la precipitación mensual de las estaciones empleadas.

Los tipos de vegetación y uso de suelo clasificados en el modelo fueron agricultura (AGRI), pastizales (PAST), bosque mesófilo (FRSD), bosque mixto (FRST), selva alta y mediana perennifolia (FRSE), pino (PINE), manglares (WETF), popal y tular (WETN), áreas urbanas (URML) y cuerpos de agua (WATR). En base a las categorías definidas, SWAT integra las características biofísicas de los ecosistemas y agroecosistemas que influyen en los procesos hidrológicos, como la evapotranspiración y percolación.

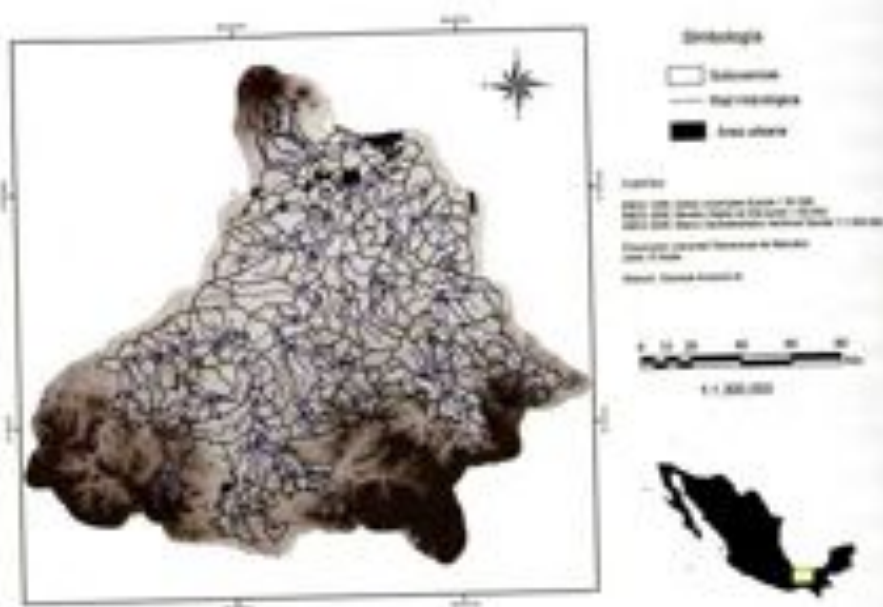
Gráfica 26
Promedio de las precipitaciones mensuales (1982-2005) de las 15 estaciones utilizadas en el modelo SWAT



De manera similar, se recategorizaron los tipos de suelos usando la clasificación correspondiente a la base de datos de la FAO, de donde se integraron parámetros fisicoquímicos del suelo, como porosidad, textura, conductividad hidráulica y eléctrica, entre otros. La inclusión de las propiedades físicas y químicas en el modelo SWAT son esenciales para la modelación hidrológica, ya que éstas intervienen significativamente en los procesos de drenaje, escurrimiento superficial y sedimentación. Los tipos de suelos considerados en el modelo fueron un total de 28, siendo los más predominantes el acrisol, luvisol y regosol (INEGI, 1995).

Resultados y discusión

El modelo hidrológico SWAT, de acuerdo a la topografía de la cuenca, analiza la superficie susceptible de relacionar, por lo que el área final observada es de 15 293.75 km², es decir, el 88.05% del total de la superficie de la cuenca. Dentro de esta superficie, SWAT generó un total de 265 microcuencas (mapa 51), permitiendo determinar la distribución espacial y detallada de las características hidrológicas en cada microcuenca y su relación con las características de uso de suelo, tipos de suelo, topografía y los datos climatológicos de más de veinte años. Se compararon los datos reportados por la Conagua (2001, 2007) y los estimados por el modelo SWAT de gasto medio anual en la desembocadura y escurrimiento total, considerando el área analizada, siendo 440.8 m³/s vs 577.5 m³/s para el gasto medio, y 28 839 hm³/año vs 20 171.4 hm³/año de escurrimiento total, por lo que los datos estimados son considerados como aceptables.



Mapa 51
Subdivisión de la cuenca (SPN) por el modelo SWAT
Fuente:
Armenta-Montes,
datos no publicados

El modelo SWAT, de acuerdo a las características físicas generales y al porcentaje de superficie que ocupa cada tipo de vegetación, finalmente agrupó ocho tipos de uso de suelo y vegetación (cuadro 5). La agricultura y el pastizal ocupan casi el 60% de la superficie total de la cuenca, arriba de las cifras estimadas para el país, que es del 21% (Velázquez *et al.*, 2000); las selvas están presentes en un 35%, lo que indica la representatividad de este ecosistema en el sureste mexicano; y el resto de la superficie con otros ecosistemas. Es curioso la imperceptible representación del bosque mesófilo (0.92 %) y un porcentaje aceptable de los humedales (3.74 %).

CUADRO 5

Tipo de uso de suelo y vegetación estimado por el modelo SWAT

Uso de suelo	Área (%)
Pastizal (PRST)	34.20
Selva alta y mediana (FRSE)	34.64
Agricultura (AGRL)	5.81
Popal - Tular (METN)	3.74
Bosque mesófilo (FRSD)	0.92
Bosque mixto (FRST)	0.40
Urbano (URLM)	0.27
Cuerpos de agua (WATR)	0.03

Se logró la caracterización hidrológica de la cuenca. En el cuadro 6 se muestran los principales procesos hídricos. Es notable que el 49% de la precipitación y 96% de la producción del agua se pierda por escurrimientos superficiales, lo cual indica la poca infiltración en la cuenca, y la existencia, de inicio, de un grave problema de inundación para la cuenca media y baja, por ser una de las zonas con altas tasas de precipitación. La evapotranspiración es de 1 304.9 mm, es decir, el 49% de la precipitación, lo que indica la posibilidad de almacenamiento y captación del agua si se empiezan a mejorar las condiciones paisajísticas y de los ecosistemas.

CUADRO 6

Distribución de las principales características hidrológicas en la cuenca del río Coatzacoalcos

Características hidrológicas	Valor anual
Precipitación (PREC)	2 686.6 mm
Escurrimiento superficial (SURQ)	1 318.9 mm
Escurrimiento lateral (LATQ)	13.5 mm
Escurrimiento superficial (GWQ)	40.2 mm
Evaporación (E)	16.6 mm
Recarga de acuíferos (AQ)	2.8 mm
Recarga total al suelo (AQT)	36.5 mm
Producción de agua (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS)	1 309.5 mm
Percolación profunda (PERC)	36.9 mm
Evapotranspiración (ET)	1 304.9 mm
Evapotranspiración potencial (PET)	25 860.4 mm
Pérdidas por transmisión (TLOSS)	3.7 mm
Producción de sedimentos (TSED)	36.3 ton/ha

Se compararon un año de inundaciones (1989) y un año normal (1997) para mostrar diferencias bajo distintas condiciones climáticas en la cuenca (cuadro 7). Existe un aumento del 32% de precipitación, del 68% de producción de agua y del 31% del escurrimiento subsuperficial en 1989, lo que indica mayor probabilidad de inundación al

tener más agua escurriendo cuenca abajo y mayor permanencia de la misma en el subsuelo, lo que permite que se almacene y que su salida sea más lenta en un evento de inundación. Es importante resaltar el aumento del 272% del transporte de sedimentos en 1989, es decir, que al aumentar la cantidad de precipitación también aumenta la pérdida de suelo.

CUADRO 7

Comparación de dos años distintos de acuerdo a sus características hidrológicas en la cuenca del río

Año/Parámetro	1997 (Normal)	1998 (Inundaciones)	Cambio (%)
PREC	2 491.8 mm	3 306.16 mm	32
SURQ	1 086.6 mm	1 821.3 mm	70
LATO	15.22 mm	15.89 mm	4
GWO	36.72 mm	48.28 mm	31
PERC	48.75 mm	69.59 mm	43
SW	75.14 mm	50.81 mm	-32
ET	1 390.6 mm	1 408.04 mm	1
WYLD	1 117.23 mm	1 882.53 mm	68
TSED	20.71 ton/ha	76.96 ton/ha	272
NO_SURQ	5.65 kg/ha	7.61 kg/ha	35

Se muestra el año 2005 para ejemplificar las condiciones más recientes en la cuenca, encontrando que la variable del escurrimiento superficial (SURQ) y el transporte de sedimentos en el río (SED_OUT) son los más representativos. Los resultados muestran que existe una alta escorrentía superficial en las subcuencas que están relacionadas directamente con la presencia de pastizales y en menor proporción con agricultura o selvas (cuadro 8).

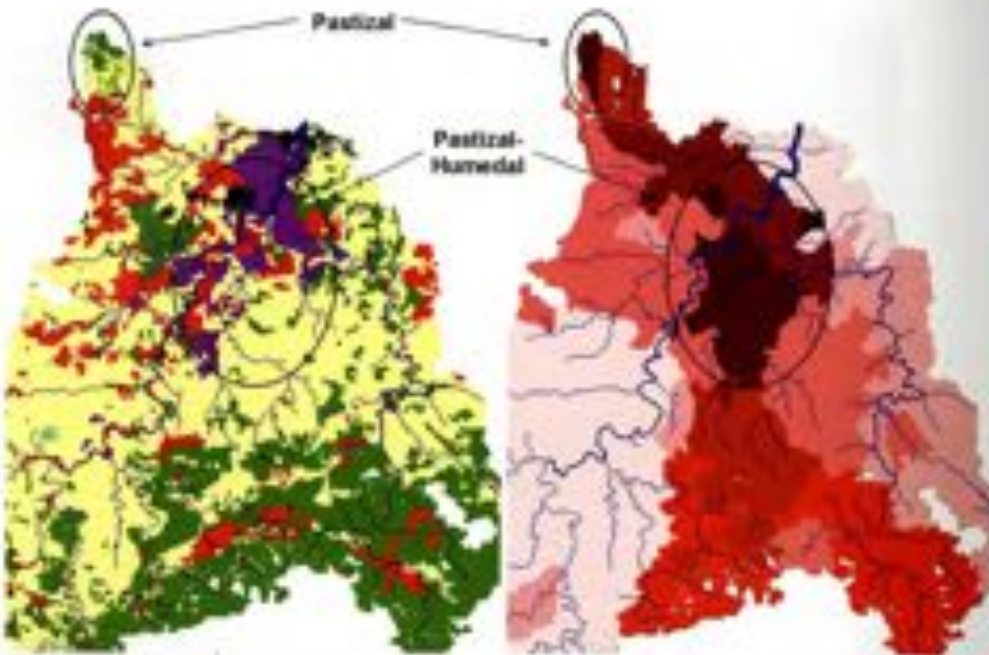
El afluente Coachapa, en el municipio de Minatitlán (cuenca baja), presenta la zona más extensa con fuertes escurrimientos superficiales (hasta 3 526.7 mm/año), área con más del 90% de superficie con pastos, además de tener una precipitación anual por encima de los 4 000 mm, con lo que

CUADRO 8

Subcuencas con alta escorrentía superficial (SURQ) en la cuenca del río Coahuacalcos

Microcuenca	Afluente principal	Municipio	Uso de suelo	Altitud (m)	Área (ha)	SURQ (mm)
1	Calzadas	Sochapan	Pastizal-seba	638	3 442.3	3 707.1
2	Calzadas	Sochapan	Pastizal-seba	682	3 858.5	3 586.9
32	Coachapa	Mixtlán	Agricultura - pastizal - humedad	28	3 366.7	3 126.7
90	Coachapa	Mixtlán, Huitzilgunkilán	Pastizal	19	15 099.3	3 418.6
80	Upenapa	Mixtlán	Pastizal	20	4 542.7	3 407.8
88	Coachapa	Mixtlán	Pastizal	5	4 902.2	3 400.1
40	Coachapa	Mixtlán	Agricultura - humedad	5	4 790.2	3 301.3
39	Upenapa	Mixtlán	Pastizal	10	6 736.5	3 156.7
51	Upenapa	Mixtlán	Pastizal - humedad	5	2 106.1	3 139.4
54	Coahuacalcos	Cosoleacaque	Pastizal - urbano	18	3 357.2	3 117.0
71	Upenapa	Mixtlán	Pastizal	7	580.5	3 095.1
46	Cosoleacaque	Mixtlán	Pastizal - humedad	5	3 312.3	3 067.8
45	Coahuacalcos	Mixtlán	Pastizal - agricultura - humedad	5	6 018.7	3 012.8
67	Coachapa	Huitzilgunkilán, Mixtlán	Pastizal - humedad	5	11 791.8	3 036.6
38	Cosoleacaque	Mixtlán	Agricultura - pastizal	5	898.5	3 028.4

aumentan los volúmenes de agua transitables hacia la cabecera del mismo municipio y los humedales. La parte alta del río Calzadas (recibe el nombre de río Huazuntlán), microcuenca que nace en las faldas del volcán Santa Marta y transformada para pastizales, muestra los más altos valores de escurrimientos (3 707.1 mm/año), que bajan directamente a los municipios de Chinameca y Cosoleacaque, aumentando la probabilidad de inundación (mapa 52). Estos datos indican que grandes áreas de agricultura y pastizal responden más rápido a eventos de lluvia extrema, ya que aumentan los valores de escurrimientos superficiales como lo mencionan también Benavides y colaboradores (2008) en la cuenca Tapalpa, Jalisco.



Mapa 12
Zonas con mayores exaramientos superficiales en la cuenca del río Coatzacoalcos
Fuente:
Autoría: Meryem
Dato no publicado

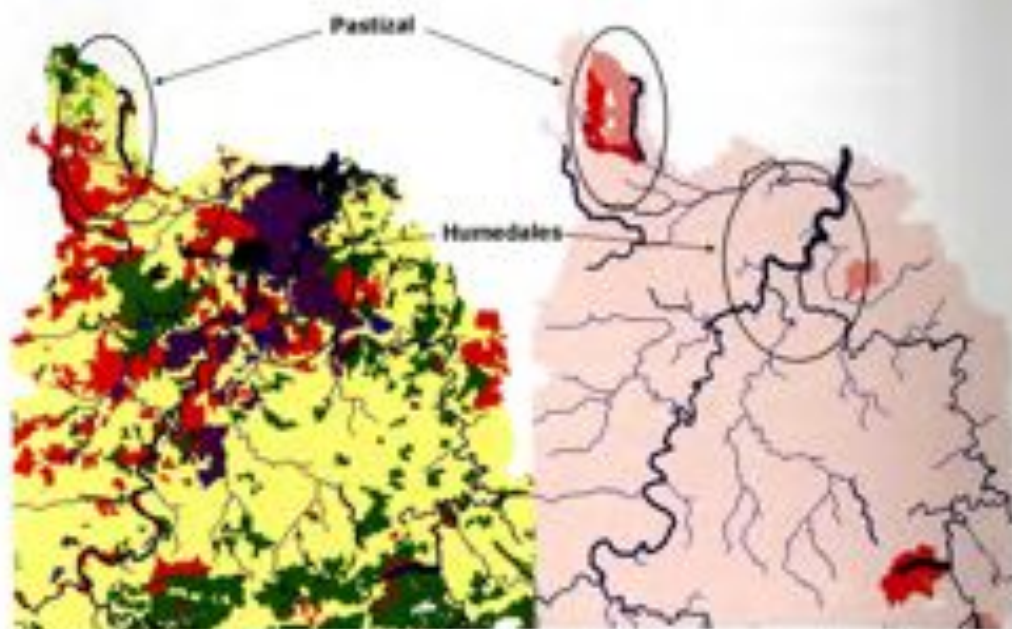
En el caso de los sedimentos, las áreas con problemas están localizadas principalmente en el paraguas de las cuencas de los ríos Coatzacoalcos y Calzadas, en la zona de humedales en la cuenca baja y en la parte alta y media del río Uxpanapa (cuadro 9). La zona donde inicia el río Coatzacoalcos se caracteriza por remanentes de selva y/o acompañada de pastizal o agricultura, con pendiente pronunciada, donde el río transporta alrededor de 2 668 000 ton/año de sedimentos. Una vez más, la cuenca alta del río Calzadas (río Texizapan en su nacimiento) cubierta por pastizales en su totalidad y localizada en los bajos del volcán Santa Marta, aporta 316.3 ton/ha/año de sedimentos, transportando alrededor de 1 164 000 ton/año en el río. Cabe mencionar que el río Texizapan es uno de los tributarios del Sistema Yarihía, acueducto que abastece a las poblaciones de Minatitlán y Coatzacoalcos, por lo que con estas

grandes cantidades de sedimentos, no es extraño que el sistema cierre frecuentemente sus válvulas por aumento de turbiedad.

La cuenca baja del río Coatzacoalcos, zona de humedales localizada entre los poblados de Minatitlán, Cosoleacaque y Coatzacoalcos, es la que presenta graves problemas de transporte de sedimentos en el río, hasta de 2 178 000 ton/año (mapa 55); este lugar ha sido víctima de frecuentes inundaciones. La cantidad concentrada de sedimentos es una de las posibles causas de inundación y aumento en la proliferación de enfermedades dermatológicas y diarreicas por azolvamiento del río.

CUADRO 9
Subcuencas con alto transporte de sedimentos (SED_OUT) en la cuenca del río Coatzacoalcos

Microcuenca	Alfabeto principal	Municipio	Uso de suelo	Altitud (m)	Área (ha)	Sed. out (ton/año)
261	Coatzacoalcos	Santa María Chimatop	Selva	360	4061.2	2 668 000.0
265	Coatzacoalcos	Coatzacoalcos	Urbano - pastizal	10	2 381.3	2 178 000.0
9	Coatzacoalcos	Coatzacoalcos	Selva - humedal	10	638.0	2 178 000.0
133	Uxpanapa	Minatitlán	Agricultura - selva	173	8 526.7	1 920 000.0
28	Coatzacoalcos	Sihuatlán del sureste, Minatitlán	Pastizal	28	2 004.7	1 849 000.0
21	Coatzacoalcos	Cosoleacaque, Sihuatlán del sureste	Pastizal - humedal	5	3 238.0	1 848 000.0
14	Coatzacoalcos	Cosoleacaque, Nanchital	Pastizal - urbano - selva	10	627.7	1 848 000.0
25	Coatzacoalcos	Minatitlán	Humedal	5	1 805.7	1 829 000.0
11	Coatzacoalcos	Minatitlán	Humedal - urbano	5	2 729.2	1 360 000.0
36	Coatzacoalcos	Minatitlán	Pastizal - humedal - agricultura	3	981.0	1 215 000.0
4	Calzadas	Texizapan, Teahuacán, Mecapan	Pastizal	227	10 327.5	1 164 000.0
194	Coatzacoalcos	Uxpanapa	Agricultura - selva	121	7 935.7	1 148 000.0
220	Uxpanapa	Uxpanapa, Santa María Chimatop, Nanchital	Agricultura - selva	98	6 973.7	1 051 000.0
257	Coatzacoalcos	Teahuacán, Barro de la Soledad	Pastizal - selva	308	11 600.2	883 000.0
88	Coatzacoalcos	Huixtla, Teahuacán	Pastizal - agricultura	18	9 391.3	877 800.0



Mapa 13
Transporte de
sedimentos en zona
de humedales de
la cuenca del río
Coatzacoalcos
Fuente:
Instituto Mexicano
de Tecnología del Agua
Datos no publicados

Por último, en la parte alta del Uxpanapa en los tramos La Ceiba y Tenochtitlan con 1 051 000 ton/ha/año y 1 920 000 ton/ha/año, respectivamente, áreas que presentan una combinación de agricultura con remanentes de selva, lo cual indica que esta región ya está mostrando las consecuencias del mal manejo de las partes altas. Es necesario mencionar que la zona del río Uxpanapa es uno de los afluentes más importantes en la región, contribuye con el 25.2% de los escurrimientos en la cuenca (Consejo de Cuenca del río Coatzacoalcos, 2010) y provee a la zona industrial de Coatzacoalcos a través del Acueducto Uxpanapa-La Cangrejera.

Conclusiones

El modelo SWAT simuló las características hidrológicas en la cuenca Coatzacoalcos de manera

aceptable, analizando el 88.05% del total de la superficie de la cuenca. Presenta el 60% de la superficie ocupada por sistemas agropastoriles, el 40% con algún tipo de selva, bosque o humedal, siendo selvas las de mayor representatividad en un 35%. Las selvas altas y medianas perennifolias y subperennifolias son sistemas complejos, con una gran biodiversidad y servicios ecosistémicos, incluyendo la regulación del ciclo hidrológico.

Se evaluaron procesos del ciclo del agua, es decir, las características hidrológicas en la cuenca del Coatzacoalcos, y se encontró que la mayor cantidad de la producción del agua se pierde por escurrimientos superficiales (96%), lo que explica el problema recurrente que presenta la cuenca baja por fenómenos meteorológicos o tormentas, ya que casi el 49% de lo que llueve se está perdiendo en escurrimientos, aumentando también los sedimentos hacia el río. Cuando aumentan la cantidad de lluvia, los escurrimientos y la producción del agua, también aumenta la probabilidad de inundación cuenca abajo. Al tener mayor entrada al sistema, el subsuelo empieza a saturarse y el agua tarda más en salir.

Las variables que presentan problemática en ciertas áreas de la cuenca del Coatzacoalcos son el escurrimiento superficial y el transporte de sedimentos. Las áreas con mayor escurrimiento superficial (3 707-3 228 mm) son el río Coachapa, el cual desemboca 5 km arriba del poblado de Minatitlán; también la cuenca alta del río Calzadas, el cual nace en el volcán Santa Marta y desemboca en la ciudad de Coatzacoalcos. Dichas áreas coinciden con zonas agropecuarias, principalmente de pastizales, es decir, que existe una relación entre la existencia de potreros y los escurrimientos.

El transporte de sedimentos en el río (2668 000 ton/año) se presenta en áreas con algún tipo de alteración, tanto en zonas con pendientes como en la cuenca baja. Una gran cantidad de sedimentos se transporta desde el parteaguas de dos de los principales afluentes, el río Coatzacoalcos y el río Calzadas; concentrándose en la zona de humedales (2 178 000 ton/año). Es necesario resaltar que estos ríos desembocan y transitan por los poblados de Minatitlán y Coatzacoalcos, lo que indica un azolvamiento de estos tramos hidrológicos, al disminuir el potencial de mitigación que tienen estos afluentes en eventos de lluvias torrenciales. En varias ocasiones se ha comunicado la necesidad de dragar el río Coatzacoalcos, pero a pesar de que en el Golfo de México cada año se dragan 100 millones de toneladas de sedimentos (Rivera y Borges, 2006), se ha notado que esto no es suficiente para revertir la frecuencia y los impactos de las inundaciones.

El río Uxpanapa es uno de los tributarios más importantes de la cuenca -que nace en una zona biológicamente interesante por mantener los últimos manchones de selva alta-, razón por la que existe una gran preocupación, debido a las considerables cantidades de sedimentos transportados en este río, consecuencia, probablemente, de la deforestación masiva recurrente desde los años setenta. Como nos podemos dar cuenta, el planteamiento de conservación y reforestación con especies nativas, la organización de las comunidades afectadas o beneficiadas y de propietarios de remanentes de zonas forestadas en la cuenca alta y media del río Uxpanapa son realmente inaplazables.

Muchas de las acciones en torno a la cuenca del Coatzacoalcos se han enfocado en la continuidad

del abastecimiento del agua para la zona industrial y el servicio público, pero muy poco se ha hecho en relación al tratamiento de las aguas residuales e industriales, la regulación de los sistemas agropecuarios, el uso de fertilizantes o herbicidas en los cultivos, el ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y la reforestación o conservación de las partes altas de la cuenca.

Como ya se ha señalado, la ocupación y transformación de los territorios regionales de Veracruz ha ocurrido como consecuencia de distintas formas de apropiación de los recursos naturales, que se originan de distintos valores de uso de los entornos naturales (basta tomar como ejemplo el impacto de la explotación petrolera o de la destrucción de selvas para ampliar el área agropecuaria). Actualmente, el 74% del territorio veracruzano está fuertemente antropizado, y esta transformación territorial se ha asociado a una creciente problemática ambiental expresada de distintos modos, entre los que destaca la pérdida de biodiversidad, de recursos naturales y de servicios ambientales, lo cual repercute y potencializa los impactos del cambio climático.

Es necesario hacer esfuerzos que conjuguen diferentes visiones, analizando la historia social y ambiental que han configurado el paisaje; con estas bases y paralelamente con un compromiso social, la tarea de recobrar el capital natural de Veracruz es viable. En este mismo sentido, es preciso encontrar una línea de trabajo definida para el área de la cuenca del río Coatzacoalcos, cuyas modificaciones de origen antrópico dirigidas al cambio de uso de suelo han modelado el paisaje actual y han desencadenado problemas de inundaciones en zonas bajas de la cuenca. Asimismo, se requiere

plantear acciones específicas de restauración ecológica, dirigidas a recobrar el capital natural de la zona de Uxpanapa a través de un reconocimiento de su propia diversidad, en un esquema de inclusión social, promoviendo la participación de los habitantes locales en el compromiso de recuperar sus recursos históricamente modificados.

Bajo el escenario actual, donde los ecosistemas naturales se encuentran muy fragmentados y una gran proporción de éstos han sido convertidos en zonas agrícolas y ganaderas, se ha planteado la restauración ecológica como la alternativa viable para la recuperación de los ecosistemas depauperados. Esto tiene como fin último la recuperación de los servicios ecosistémicos y del bienestar social.

Estrategia restauración ecológica

Es ampliamente reconocido que para regular las inundaciones es fundamental el mantenimiento de condiciones adecuadas del suelo (profundidad, textura y contenido de materia orgánica), de la cobertura vegetal (tanto en las partes altas de las montañas como a lo largo de los ríos y de las costas), de los humedales y de los lagos (Bahnera *et al.*, 2009). Por ello, se ha propuesto que acciones como la reforestación de los ecosistemas terrestres y costeros –aplicable para las principales cuencas del estado de Veracruz–, que incrementen la cobertura vegetal, pueden ser muy relevantes para mitigar los impactos negativos de las inundaciones (Manson *et al.*, 2009). Esto es de suma importancia para el estado, debido a que su territorio recibe el 12% de la precipitación total nacional y el 28% del escurrimiento pluvial del país (Conagua, 2002), que

sumado a la gran pérdida de cobertura vegetal, que hoy en día continúa, colocan en gran riesgo el desarrollo de la planicie costera del estado y de sus poblaciones.

En la actualidad, la ecología de la restauración ofrece un cuerpo teórico que puede servir como base para establecer prácticas de recuperación de los procesos ecosistémicos. La estrategia de restauración pretende acelerar los procesos ecológicos mediante la reintroducción de especies nativas, utilizando como criterio de elección sus características funcionales y sus efectos en la funcionalidad del ecosistema. Por lo que los grupos funcionales pueden ser implantados en relación a la situación que se desee restaurar en cada ecosistema y de acuerdo al grado de deterioro. Con esto se podría reactivar y acelerar la dinámica natural de los ecosistemas; por ejemplo, para restituir zonas de pastizales asociados a selvas tropicales altas se podrían seleccionar especies típicamente pioneras, de crecimiento rápido, con hojas anchas y alta producción de semillas. Estas características permiten modificar el microambiente, permitiendo la llegada y establecimiento de especies con otras historias de vida, como las especies primarias.

En la gráfica 27 se presenta el esquema conceptual de la propuesta de restauración, en el que se puede apreciar la relación entre las funciones ecosistémicas y la integridad del sistema. Al integrar grupos funcionales clave a un ecosistema degradado se pueden recobrar la mayoría de sus funciones. Para esto es necesario detectar el punto de integridad en el que se encuentra el sistema (puntos pequeños en la gráfica 27) y determinar el o los grupos funcionales pertinentes para acelerar el proceso de restauración. Una vez que la mayoría de los procesos

se han recuperado en el sistema (círculo sin relleno, ver gráfica 27), se debe aumentar la redundancia funcional para garantizar la resiliencia del sistema. En sistemas intensamente dañados y/o con fuerte presión antrópica (áreas rurales-urbanas adyacentes) se puede optar por desviar la trayectoria natural del sistema (línea azul continua, ver gráfica 27) y reemplazar las áreas por sistemas diferentes (agroecosistemas, parcelas comunales, parques etcétera; círculo sólido, ver gráfica 27), diseñadas de tal manera que puedan proveer bienes y servicios sociales y ambientales, además de funciones ecosistémicas con una menor diversidad taxonómica.

Tomando esta definición conceptual, la propuesta práctica general de la estrategia de restauración ecológica se resume en cuatro fases principales (esquema 6), las cuales se describen a continuación:

Gráfica 27
Relación entre
la integridad
del ecosistema
y las funciones
ecosistémicas



- *Identificación de zonas con diferentes grados de perturbación.* En cada zona por restaurar se debe realizar un diagnóstico para identificar la problemática ecológica y social. A través de un análisis cartográfico se delimitan las áreas naturales, urbanas y se determina el estado del uso del suelo. Esto sirve para establecer la estrategia de muestreo y la caracterización ecológica de la zona y para detectar los sitios que será necesario restaurar. La definición de la estrategia de restauración será consensuada con los pobladores locales, para definir el tipo de especies nativas que son de su interés o según el caso el tipo de uso que se le dará a la zona. Se debe dar prioridad al uso de especies locales que puedan recuperar las funciones básicas del ecosistema original.

- *Determinación de especies ecológicamente importantes en cada componente antrópico.* Para áreas naturales con distintos niveles de integridad y con el potencial de ser restauradas se lleva a cabo una caracterización de la estructura y diversidad vegetal existente. A través de muestreos de la vegetación para determinar la frecuencia, dominancia y densidad de cada especie en los distintos componentes del mosaico de regeneración natural y la presencia de plántulas, lo cual representa el potencial de regeneración *in situ*. Para establecer la función potencial de cada especie en las distintas etapas de sucesión natural se desarrolla un análisis de similitud de la composición florística de todas las fases del mosaico de regeneración natural. Esta etapa representa una buena oportunidad para detectar en campo los procesos limitantes de la restauración natural (herbivoría, procesos de densodependencia,

demografía, impacto de polinizadores-dispersores, depredación, nutrientes en el suelo, entre otros) sobre los procesos de desarrollo y establecimiento de plántulas en su ambiente natural.

- *Identificación y selección de especies y grupos funcionales.* Apoyados en los análisis de estructura de vegetación y con la documentación de la historia natural de cada una de las especies (síndrome de dispersión-polinización, tasa de crecimiento, tamaño-número de semillas, área foliar específica, asociaciones con micorrizas, etcétera), se pueden construir e introducir grupos funcionales que impulsen la recuperación de las funciones de cada una de las zonas y aceleren los procesos de regeneración natural. De manera paralela, para las especies que formarán los grupos funcionales de restauración, se realiza una exhaustiva búsqueda en la literatura sobre sus principales características de historia de vida. Asimismo, se desarrollarán pruebas de viabilidad de semillas, ensayos de germinación y generación de protocolos óptimos para la producción de plantas que se podrán utilizar en el proceso de restauración. Es importante señalar que el germoplasma para realizar esta actividad será colectado, preferentemente, en la misma zona, para aprovechar adaptaciones locales de los ecotipos a las condiciones ambientales propias de la zona.
- *Establecimiento de especies/grupos funcionales que aceleren el proceso de restauración natural y monitoreo de acciones.* Con la información generada se diseña la estrategia de introducción de especies, la

cual no incluye solamente la reintroducción de especies a la zona por restaurar, sino también la aplicación de técnicas como la translocación de plántulas, la facilitación para el desarrollo de las plantas existentes o la inserción de árboles instantáneos. Como un paso fundamental para validar la implementación de estas estrategias, se debe establecer paralelamente un programa de monitoreo. En éste se realizarán medidas del desempeño de las especies, definición de los grupos funcionales y de las características ecosistémicas de la zona restaurada, y cuando sea el caso se incluirán nuevos insumos que incrementen la funcionalidad y/o aumenten la resiliencia de los ecosistemas.

■ **Esquema 6**
Estrategia de restauración. Los cuadros rojos indican las etapas principales y los cuadros azules las etapas complementarias.



Estrategia piloto de restauración ecológica: Uxpanapa. La zona de Uxpanapa, Veracruz, está ubicada en el límite con los estados de Oaxaca y Chiapas, dentro de la cuenca del Coatzacoalcos, parteaguas de los ríos Uxpanapa y Coatzacoalcos. La superficie del área contemplada ocupa parte de los municipios de Las Choapas, Sayula de Alemán, Minatitlán, Hidalgotitlán, Jesús Carranza y Uxpanapa, abarcando un gradiente altitudinal que va de los 50 a los 1 400 mm.

Esta zona constituye el relicto más extenso de selvas tropicales mejor conservadas en el estado de Veracruz y puede considerarse como uno de los centros de diversidad biológica más importantes del país, ya que en ella se encuentran especies de vertebrados endémicos y especies en peligro de extinción, amenazadas, bajo protección especial y raras. Muestra de esto es que en unas pocas hectáreas podrían hallarse más de 1 000 especies de plantas (incluyendo musgos, helechos y epífitas), de las cuales por lo menos alrededor de 244 tendrían alguna utilidad potencial para el uso humano (Caballero *et al.*, 1978).

A pesar de que tales factores determinan que esta región sea especialmente importante desde el punto de vista biológico, ha sido fuertemente castigada por decisiones políticas erróneas que han disminuido de manera dramática su cobertura vegetal. Parte de estas decisiones fue la construcción de la presa Cerro de Oro en el estado de Oaxaca, en 1972. Esta obra se planeó en el marco del programa de sistemas de presas asociadas a ríos tributarios del Papaloapan, con la consigna de controlar definitivamente las inundaciones y satisfacer la demanda de energía eléctrica y de distritos de riego. Esto contribuiría a la satisfacción de los requerimientos alimenticios y energéticos nacionales, meta que no

se alcanzó. Para la realización de esta obra se llevó a cabo un plan de reacomodo de la población de la zona inundada en Oaxaca hacia las zonas de selva del Uxpanapa. Para lograr este acomodo, se inició un plan que involucraba el desmonte de miles de hectáreas de selvas tropicales lluviosas y un costoso plan de reubicación de los indígenas desplazados, por lo que los nuevos pobladores se enfrentaron a un ambiente inhóspito y sin servicios, del cual desconocían sus formas de manejo básico y no tenían el arraigo que los estimulara al cuidado de sus nuevos recursos naturales. Esto en conjunto propició uno de los mayores "ecocidios" suscitados en la historia del trópico mexicano.

Actualmente los factores antrópicos siguen teniendo una fuerte presión sobre la región, el aumento de la frontera ganadera y agrícola es una de las mayores fuerzas de cambio para la zona. Esto ocasiona una rápida disminución de las áreas boscosas remanentes que quedan reducidas a fragmentos, los cuales están limitados a pendientes muy pronunciadas y suelos calizos. Un efecto sinérgico a la ganadería extensiva en la zona es la transferencia de contaminantes entre fragmentos, ya sea vía hidrológica o biológica, y la transferencia de carga de sedimentos derivados de la erosión del suelo hacia zonas bajas de las cuencas, susceptibles a la colmatación, lo que incrementa el riesgo de inundación en estas zonas.

Es urgente realizar acciones que mitiguen los efectos negativos de la deforestación y de manera particular sus efectos en los riesgos de inundación en la región del Uxpanapa, la cual por sí sola constituye el 30% de la superficie total de la cuenca del Coatzacoalcos. Recientemente se han realizado las primeras aproximaciones encaminadas

a establecer una estrategia de restauración ecológica que favorezca la recuperación de cobertura vegetal en la región del Uxpanapa. Y actualmente se ha desarrollado la etapa de identificación de zonas con diferentes grados de perturbación, así como la determinación de especies ecológicamente significativas en cada componente antrópico.

Estas primeras aproximaciones muestran que esta región está fuertemente antropizada, compuesta de un mosaico de distintos usos de suelo, los cuales van desde pastizales de uso ganadero hasta áreas de selva tropical en buen estado de conservación. Entre estos dos extremos encontramos coberturas intermedias como los pastizales abandonados, cultivos de cítricos, plantaciones de hule, acahuales en diversas etapas de sucesión, cercas vivas, vegetación de galería. En conjunto estas coberturas tienen la capacidad de retener una amplia diversidad de especies vegetales, siendo el inóculo de planes de restauración para la zona.

En el cuadro 10 se puede observar la cobertura de los diferentes componentes del paisaje que conforman actualmente la zona de Uxpanapa. Los tres componentes más representativos de Uxpanapa son los potreros, las selvas y los acahuales, que juntos integran el 96% de la cobertura total (mapa 54).

CUADRO 10

Cobertura de los principales componentes del mosaico de la vegetación natural

Tipo de cobertura	Área (km ²)
Potreros	299 316.3900
Selva	192 215.2300
Acahuales	98 140.3200
Vegetación afectada por incendios	8 634.8900
Plantación de hule	5 067.5800
Cuerpos de agua	3 713.6600
Cultivo de cítricos	2 570.0300
Urbano	1 795.3000
Sin vegetación	60.1000

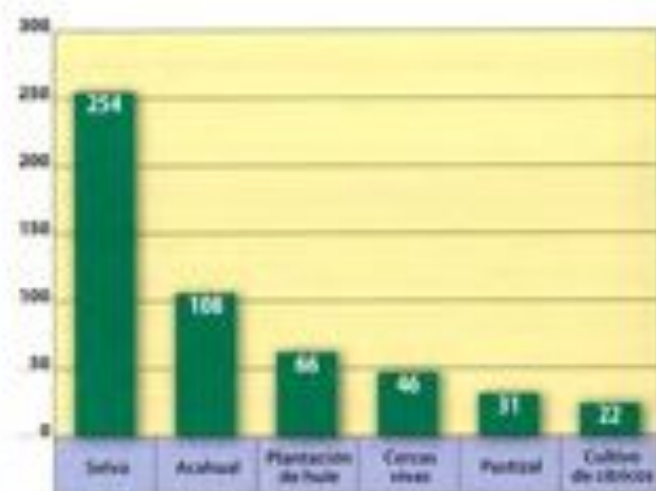


Existe otro grupo de uso de suelo cuya cobertura es de menor área (2.3% de la superficie total de la zona), integrado por plantaciones de hule, de cítricos y las dañadas por los incendios de 1998, estas últimas mantienen un proceso natural de sucesión diferente al que se manifiesta dentro de los acahuales.

Desde el punto de vista cuantitativo la pérdida de cobertura de vegetación natural en la zona es alarmante, ya que sólo se preserva el 36.8% de selva, la cual en su mayoría se mantiene en fragmentos aislados de vegetación o en zonas con pendientes muy pronunciadas. Sin embargo, desde el punto de vista de restauración ecológica, la configuración actual de la región presenta el potencial de retener componentes de diversidad importantes, los cuales pueden servir para iniciar programas de restauración para la zona.

Mapa 54
Coberturas de uso de suelo y vegetación en la zona de Uxpanapa
Fuente:
Centro de Investigaciones Tropicales, 2011

Como parte de la metodología para la determinación de especies ecológicamente importantes en cada componente antrópico, se realizó un muestreo prospectivo del estrato arbóreo de los distintos componentes del paisaje de la zona. En este trabajo se registraron 374 especies en total de árboles mayores a 10 cm de diámetro, a la altura de 1.3 m del suelo. Las zonas de selva tuvieron la mayor riqueza arbórea con un total de 254 especies, seguidas por los acahuales que presentaron 108 especies. En las zonas fuertemente intervenidas, como las plantaciones de hule, se registraron 66 especies. Dentro de este mosaico destaca en el paisaje la presencia de "cercas vivas", las cuales se usan para limitar las propiedades (usualmente pastizales) y que muestran también una importante retención de diversidad vegetal, en ellas se registraron 46 especies diferentes de árboles. Este tipo de cercas tienen el potencial de conectar fragmentos y de ser catalizadores de la conversión de pastizales a zonas restauradas. Dentro de los pastizales se registraron 31 especies arbóreas y en los cultivos de cítricos 22 (gráfica 28).



Gráfica 28
Número de especies registradas en cada uno de los elementos del paisaje de Uxpanapa, para árboles mayores a los 10 cm de diámetro

Además de la riqueza de diversidad vegetal que guarda cada uno de los elementos del paisaje de Uxpanapa es fundamental analizar el tipo de especies que dominan en cada uno de estos ecosistemas (cuadro 11). Por ejemplo, en las zonas de selva persisten especies de crecimiento lento y muchas de ellas de gran biomasa como *Dialium guianense* o palmas típicas de zonas conservadas como *Astrocaryum mexicanum*; además, una importante presencia de *Rinorea guatemalensis*, especie que es reportada como elemento de regeneración de otras selvas medianas y altas perennifolias de México (Gómez, 1985). Por ello, es conveniente coleccionar semillas de estas especies para enriquecer los acahuales y acelerar la recuperación a estadios más avanzados de la sucesión.

CUADRO 11

Lista de las diez especies más representativas de algunos de los componentes del mosaico antropizado de la región de Uxpanapa

Pastizal	Cercas vivas	Plantación de hule	Acahual	Selva
<i>Cordia alliodora</i>	<i>Glicida sepium</i>	<i>Hevea brasiliensis</i>	<i>Myriocarpa longipes</i>	<i>Rinorea guatemalensis</i>
<i>Zanthoxylum</i> sp.	<i>Miconia argentea</i>	<i>Piper hispidum</i>	<i>Pouteria sapota</i>	<i>Guarea glabra</i>
<i>Schizolobium parathyba</i>	<i>Clidemia coccinea</i>	<i>Caponea glabra</i>	<i>Trochopernum guianense</i>	<i>Astrocaryum mexicanum</i>
<i>Sternocladia daniell-smithii</i>	<i>Sternocladia daniell-smithii</i>	<i>Miconia nitens</i>	<i>Croton pyramidalis</i>	<i>Dialium guianense</i>
<i>Tabeaia rosea</i>	<i>Schizolobium parathyba</i>	<i>Piper lipathifolium</i>	<i>Rinorea guatemalensis</i>	<i>Quercus foveolata</i>
<i>Farmeria aculeata</i>	<i>Zanthoxylum</i> sp.	<i>Passiflora leucocarpa</i>	<i>Cecropia obtusifolia</i>	<i>Melastoma</i> sp.
<i>Podium guajonae</i>	<i>Clidemia setosa</i>	<i>Conocarpus wrightii</i>	<i>Clidemia setosa</i>	<i>Rondeletia bupleuroides</i>
<i>Miconia argentea</i>	<i>Sapium</i> sp.	<i>Dendropanax arboreum</i>	<i>Psychotria lindavensis</i>	<i>Psidium amabile</i>
<i>Caponea dentata</i>	<i>Bollnia viscaria</i>	<i>Inga semiolata</i>	<i>Astrocaryum mexicanum</i>	<i>Ficus occidentalis</i>
<i>Sapium</i> sp.	<i>Bellucia</i> sp.	<i>Sternocladia daniell-smithii</i>	<i>Heliconia sp.</i>	<i>Acrotychia stricta</i>

En cuanto a las especies encontradas en los acahuales (108), muchas de ellas son especies pioneras de rápido crecimiento (*Myriocarpa longipes*, *Croton*

piramidale, *Cecropia obtusifolia*, *Heliconia appendiculata*), lo que confiere una estructura poco consolidada de estas asociaciones vegetales, por lo que prestan la misma calidad de los servicios ecosistémicos a la zona. No obstante, los acahuales resguardan especies típicas de zonas conservadas como *Psittacus carolinensis*, *Rhinoceros guatemalensis* y la palma *Attacarpum mexicanum*. Esto es indicativo de que existen condiciones ambientales para el establecimiento de especies típicas de zonas conservadas.

En las zonas típicamente consideradas con baja diversidad (plantaciones de hule, cercas, pastizales) se registró un componente arbóreo heterogéneo, en cuanto a diversidad taxonómica y también de grupos funcionales que se encuentran representados. Por ello, las prácticas de manejo que no impliquen la limpieza total de estos sistemas pueden a mediano plazo retener y mantener una amplia diversidad en estas zonas, inclusive con la capacidad de sostener poblaciones de vertebrados de la región.

En el caso de los pastizales para la zona, son toleradas especies como *Conium alliodorum* y *Schizolobium pasiphae* (especies también reportadas por Del Amo y Ramos, 1993), las cuales proveen de sombra al ganado y contribuyen a la deposición de semillas que enriquecen el banco de plántulas dentro de los mismos pastizales. Además, los pastizales pueden ser diversificados con especies forrajeras que ayuden a la rehabilitación de la sobrecarga y a la compactación de suelo, y que, además, mejoren los ingresos de los pobladores.

Las cercas vivas cuando son utilizadas de manera adecuada pueden contribuir a la retención de diversidad vegetal (Dirzo *et al.*, 2009; Pulido y Renjifo, 2011). Sin embargo, en la zona no son una práctica generalizada. Un muestreo en esta área

indicó que las cercas vivas son utilizadas en el 70% de los pastizales, dejando el restante 30% a cercas muertas que tienen nula capacidad de funcionar como corredores biológicos o sitios de percha para aves que transportan semillas. Por ello, es importante promover el uso de cercas vivas y diversificarlas con especies que atraigan dispersores de semillas que aceleren los procesos de sucesión natural (Martínez y González, 2002).

Es importante señalar que las propuestas de las rutas de restauración discutidas hasta el momento se basan en un análisis de gran escala, en el que se distinguen los usos de suelo y vegetación más conspicuos y más fácilmente detectables por sistemas de percepción remota para la zona. Sin embargo, a pequeña escala existen otros elementos que pueden ser considerados en las estrategias de restauración, por ejemplo, el uso de elementos de traspatio, solares o huertos familiares, cultivos abandonados, zonas riparias, etcétera. Muchas de estas zonas están en contacto directo con la población y requieren de una intervención integral que establezca estrategias de restauración etnoecológicas, en común acuerdo con los pobladores locales, diversificando con especies nativas y adoptadas (Del Amo *et al.*, 2010). Para lograr esto es sustancial el uso de estrategias participativas que permitan construir espacios de diálogo entre los diferentes actores, sociales y gubernamentales, que intervienen en el manejo y conservación del patrimonio natural del estado. Además de asumir el hecho de que los pobladores locales son los guardianes a largo plazo de los servicios ecosistémicos, creando así una cultura de arraigo para la zona.

Ante la compleja y grave situación actual del ambiente es primordial una visión holística de esta problemática, la cual nos permita identificar los

factores raíz del incremento de las consecuencias negativas de las inundaciones y establecer estrategias que mitiguen estos efectos negativos. Sin duda, algunas de las acciones más importantes para mitigar estos efectos negativos están relacionadas con la recuperación de la cobertura vegetal de cuencas de la región del Uxpanapa. Por lo que, los planes y modelos de restauración ecológica, como el aquí planteado, con objetivos claros y acordes con la problemática local, pueden ser relevantes para disminuir el riesgo de inundación en las zonas bajas de las cuencas, además de contribuir a incrementar el bienestar social de los veracruzanos.

Recomendaciones adicionales

- Evitar la tala en la parte alta y media de las cuencas.
- Mantener y/o cultivar árboles nativos.
- Reforestar las zonas ribereñas a lo largo de la cuenca.
- Fomentar la diversificación productiva entre las áreas de cultivo.
- Producir especies maderables nativas de la selva.
- Incluir en los programas a los pobladores y capacitarlos.
- Llevar a cabo reuniones con las comunidades y asociaciones organizadas para iniciar la educación ambiental.
- Integrar el conocimiento local en materia de preservación y utilización de los distintos ecosistemas.
- Integrar el apoyo de grupos multidisciplinarios.
- Buscar conciliación entre las políticas públicas de desarrollo y las políticas ambientales de todas las instancias involucradas en la cuenca.

SIGLARIO

SIGLA	SIGNIFICADO
AD	Árboles de Decisión
AMC	Análisis Multicriterio
AMO	Oscilación Atlántica Multidecadal
AO	Oscilación del Atlántico
Conapred	Centro Nacional de Prevención de Desastres
Citro	Centro de Investigaciones Tropicales
Conabio	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
Conafor	Consejo Nacional Forestal
Conagua	Comisión Nacional del Agua
CPM	Centro de Prevención del Golfo de México
CT	Ciclones Tropicales
ENSO	El Niño/Oscilación del Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas en inglés)
FCIM	Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea
FONDOS	Fondos de Desastres Naturales
IFS	Global Forecast System (por sus siglas en inglés)
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
HEC-HMS	Hydrologic Modeling System
hPa	hectopascals
HUI	Hidrograma Unitario Instantáneo
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
MDE	Modelo Digital de Elevación
NAO	Oscilación del Atlántico Norte
N.E.	Nivel Estático
HCNational	Hurricane Center (por sus siglas en inglés)
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico
PIB	Producto Interno Bruto
Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SSTDE	Toma de Decisiones Espaciales
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
T _c	Tiempo de concentración
TDMC	Toma de Decisiones Multicriterio
USSCS	United States Soil Conservation Service