

Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000

• Jorge Brena* • Cervando Castillo • Ana Wagner •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor de correspondencia

Resumen

Brena, J., Castillo, C., & Wagner, A. (marzo-abril, 2016). Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(2), 85-98.

Se analiza la situación retrospectiva y actual de los humedales localizados en la zona de la Vertiente Pacífica del estado de Chiapas, México, para lo cual se aplicaron técnicas de percepción remota empleando imágenes satelitales tomadas en 1986, 2004 y 2010, que junto con cartografía temática digital procesada en un sistema de información geográfica permitió la evaluación prospectiva del comportamiento tendencial de los humedales al año 2030. Como resultado, se obtuvo una metodología para delimitar humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000, los mapas de uso de suelo y vegetación de las tres cuencas que integran la zona de estudio y un mapa tendencial para el año 2030. Del análisis temporal de las coberturas, su localización y la morfología del relieve, se detectaron problemas y amenazas, elaborándose un mapa de áreas críticas para orientar acciones de recuperación ambiental, reducir la erosión y el riesgo de deslizamientos que amenazan a localidades específicas. Se concluye que el diagnóstico de salud ambiental de un humedal refleja los efectos de las acciones hechas en las diferentes partes de una cuenca. La información obtenida es básica para evaluar estrategias sectoriales y desarrollar un plan de manejo integral de los recursos que promueva el crecimiento económico de la región y su aprovechamiento sustentable.

Palabras clave: humedales, percepción remota, recursos naturales.

Abstract

(March-April, 2016). *Methodology to Delimit and Characterize Wetlands at Scales of 1:50 000 and 1:20 000*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(2), 85-98.

This work analyzes the past and current state of the wetlands located in the study area, on the Pacific slope of the state of Chiapas, Mexico. To this end, remote sensing techniques were applied using satellite images taken in 1986, 2004 and 2010. This was used along with digital thematic mapping processed with a geographic information system to prospectively evaluate the trends in the wetlands' behavior through the year 2030. As result, a methodology was obtained to delimit wetlands at scales of 1:50 000 and 1:20 000. Land use and vegetation maps for the three basins in the study area were used as well as a trend map for the year 2030. The temporal analysis of vegetation cover, location and topographical morphology detected problems and threats. A map of critical areas was generated to inform environmental recovery actions and reduce erosion and the risk of landslides which threatens specific localities. It is concluded that a diagnostic of the environmental health of a wetland reflects the effects of the actions taken in different parts of a basin. The information obtained is crucial to evaluate sectoral strategies and develop an integral resource management plan that promotes the economic growth of the region as well as its sustainable use.

Keywords: Wetlands, integrated water management, remote sensing.

Introducción

La Convención de Ramsar definió los humedales como “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010b). Esta definición abarca tanto humedales continentales (lagos, ríos y marismas) como humedales costeros (bajosmareales, manglares, marismas de agua salada y arrecifes de coral).

Los humedales son algunas de las áreas de biodiversidad más importantes del mundo y constituyen el hábitat fundamental de numerosas especies; además, son proveedores particularmente importantes de servicios ecosistémicos relacionados con el agua, debido a que regulan la cantidad y purifican las aguas superficiales, favorecen la recarga de las aguas subterráneas, y en algunos casos contribuyen a regular las avenidas y mitigar el impacto de las tormentas, incrementando la resiliencia ante los torrentes; además de desempeñar papeles importantes en reciclamiento de nutrientes, cambio climático, y seguridad alimentaria y laboral.

La pérdida de humedales en el mundo se ha estimado en un 50% de la superficie original en los últimos 100 años. Esto ocurrió principalmente en las regiones templadas del hemisferio norte durante la primera mitad del siglo XIX. No obstante, alrededor de 1950, humedales tropicales y subtropicales han ido desapareciendo con rapidez, en particular los bosques de pantano y manglares (Stolk, Verweij, Stuip, Baker, & Oosterberg, 2006). Respecto a los manglares, de 1980 a 2007 se perdió 20% de su extensión total (3.6 millones de hectáreas) en el orbe; la tasa de reducción de la superficie de manglares en México se estimó en 1.5% anual (13 000 ha/año) en el periodo de 2000 a 2005 (FAO, 2007). La degradación de los humedales que quedan puede producir pérdidas de biodiversidad, cambios en las funciones ecológicas y

en los flujos de los servicios ecosistémicos, con impactos posteriores en la salud, en los medios de subsistencia y bienestar de las comunidades, y en la actividad económica.

La superficie de humedales en México es de 10 033 623 ha (González, 2012). Muchos de estos ecosistemas enfrentan un grave deterioro, sobreexplotación y contaminación de sus aguas, la desecación para la construcción de infraestructura urbana y turística, o su conversión a usos productivos (agrícolas, acuícolas y pecuarios). Para revertir la pérdida de humedales del país es necesario implementar políticas de conservación sustentadas en inventarios actualizados, que apoyen el establecimiento de programas destinados a manejar, sobre bases reales, los humedales en los ámbitos locales, regionales y nacional (Semarnat, 2008).

El *Inventario Nacional de Humedales*, escala 1:250 000, cuenta con información sistematizada que permite ubicar, identificar y tipificar los objetos que lo conforman, en mapas que muestran la ubicación, tamaño, forma y tipo de humedales en una localidad geográfica, así como la superficie cubierta por cada tipo de humedal. De esta manera, el inventario auxilia en el desarrollo e implementación de las políticas que giran alrededor de dichos sistemas (Conagua, 2012).

Para proponer las normas de protección, restauración y aprovechamiento de los humedales, así como para fijar un entorno natural o perímetro de protección de la zona húmeda, a efecto de preservar sus condiciones hidrológicas y el ecosistema, es necesario contar con inventarios precisos de estos ecosistemas en escala 1:50 000 a nivel cuencas y 1:20 000 por humedal.

Metodología

Para realizar la delimitación, inventario y caracterización de los humedales en la zona de estudio, se usaron como apoyo las metodologías desarrolladas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2006) y por la Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional del Agua (UNAM, 2011).

Ambas metodologías toman en consideración los elementos del paisaje geográfico que pueden ser cartografiados y están directamente relacionados con el agua. De esta manera se seleccionaron los temas de edafología, vegetación y uso de suelo, clima, hidrografía, relieve y el de regiones ecológicas. Es importante mencionar que en ambas metodologías se hace referencia a un enfoque potencial de aplicación cartográfica de multiescala, pero en la práctica fueron aplicadas en el país a una escala 1:250 000 ((INEGI, 2007; Conagua, 2012). Por tanto, la aportación del presente trabajo consiste en incorporar elementos hidrológicos y topográficos que de manera sistemática puedan ser empleados por múltiples instituciones para la delimitación de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000, dentro de un contexto de cuenca hidrográfica, teniendo en consideración la coherencia de los datos en cada cambio de escala.

Mediante el empleo de un sistema de información geográfico (SIG) se obtuvo la delimitación de los humedales, cuya superficie en escala 1:250 000 fue de 51 983.7 ha, en comparación con la superficie obtenida para la escala 1:20 000, que alcanzó 54 649.4 ha. La figura 1 presenta el

diagrama metodológico aplicado para obtener la delimitación de los humedales en la zona de estudio.

Para apoyar el análisis de la dinámica de la vegetación y uso del suelo en la zona de estudio se emplearon las imágenes Landsat-TM 21-49 y 21-50, con fecha de toma 4 de febrero de 1985 y 15 de enero de 1986, respectivamente, y las imágenes SPOT multiespectrales 603/319, 603/320, 604/319 y 604/320, cuya fecha de toma se encuentra referenciada en el cuadro 1, las cuales se seleccionaron para que a partir de su clasificación y análisis se generaran los mapas de uso del suelo correspondientes a los años 1986, 2004 y 2010. De esta manera se pretende representar los cambios derivados de fenómenos hidrometeorológicos extremos ocurridos en 1989 y 2005, que tuvieron impacto significativo en la zona de estudio.

Delimitación de humedales en la zona de estudio

El proceso para establecer el límite de la zona de interés en las escalas 1:50 000 y 1:20 000 se apoya en el mapa del *Inventario Nacional de Hu-*

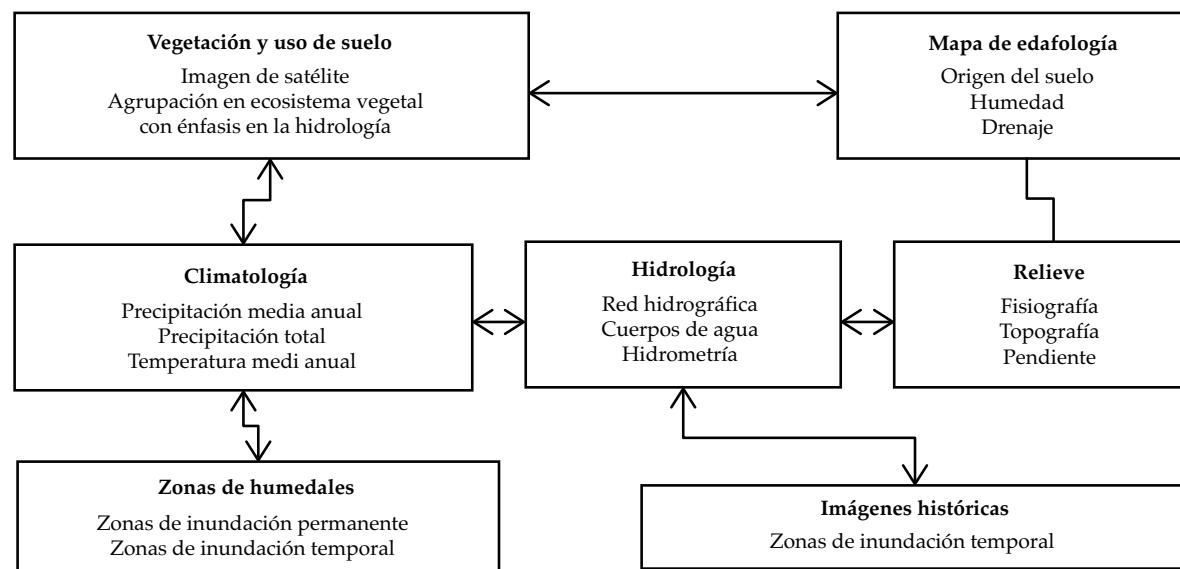


Figura 1. Diagrama metodológico del análisis espacial para la delimitación de humedales.

Cuadro 1. Imágenes SPOT XS empleadas en el estudio.

Imagen	(K/J) fecha de toma	
603/319	16 de abril de 2004	15 de enero de 2011
603/320	10 de marzo de 2004	25 de noviembre de 2009
604/319	11 de marzo de 2004	19 de noviembre de 2009
604/320	24 de enero de 2004	05 de diciembre de 2009

medales, lo cual simplifica el trabajo de ubicación y delimitación; también adapta, complementa e incorpora elementos hidrológicos y topográficos no considerados en las metodologías del *Mapa de Humedales Potenciales 1:250 000* (INEGI, 2006) e *Inventario Nacional de Humedales* (UNAM-Conagua, 2012). La ubicación y delimitación de los humedales existentes en el área de interés se obtuvo a partir de la sobreposición de los mapas correspondientes al límite hidrológico de las subcuenca con el del *Inventario Nacional de Humedales* en escala 1:250 000, empleando un sistema de información geográfica (Alonso-EguíaLis *et al.*, 2013).

Delimitación del perímetro de la zona de humedales para la escala 1:50 000

Derivado de los límites impuestos por la resolución espacial (área mínima cartografiada) de la escala 1:250 000 es necesario realizar un proceso de análisis apoyados en un SIG, para que el perímetro original cumpla con los requisitos establecidos para la escala 1:50 000, así como con la incorporación de las zonas sujetas a inundación temporal (Moreno *et al.*, 2009). Para ello se emplearon tres fuentes de información:

- a) El Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas, GASIR) y el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC, IMTA), empleados para identificar y seleccionar las estaciones hidrométricas y climatológicas dentro del área de estudio; analizar el comportamiento temporal, y determinar los períodos de mayor precipitación y escurrimiento en las cuencas de los ríos que aportan su caudal a los humedales.
- b) El banco de información de imágenes de satélite Landsat (IMTA y EROS), que aportó las imágenes adquiridas durante los períodos de mayor precipitación (Alonso-EguíaLis *et al.*, 2013) y escurrimiento identificados en Bandas y ERIC, para evaluar el comportamiento espacial de la superficie sujeta a inundación en la zona de estudio (figura 2).
- c) La base de datos de la Red Hidrográfica Interconectada (RHI), versión 2, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), que asocia los elementos hidrográficos con la subcuenca de localización, proporcionando un elemento para la nomenclatura de identificación de los humedales y los polígonos de los cuerpos de agua lóticos y lénticos adecuados para su incorporación y análisis, la cual se empleó para obtener la cobertura de cuerpos de agua en escala 1:50 000.

A continuación y dentro del ambiente de trabajo de un SIG, mediante técnicas de interpretación asistida por computadora, se generó el polígono que establece el límite de la zona inundable observada en la imagen de satélite tomada en la época húmeda. Después se sobreponen y analizan los polígonos de los cuerpos de agua de la cobertura de la RHI, omitiendo los presentes e incorporando los faltantes al mapa de trabajo; por último, se realiza la fusión de coberturas, para generar una nueva que integra la base de datos de las capas fusionadas, que conserva y asocia los datos que se utilizarán en la nomenclatura y clasificación de los humedales. La ubicación y delimitación de los humedales se obtuvo a partir de la sobreposición de los mapas

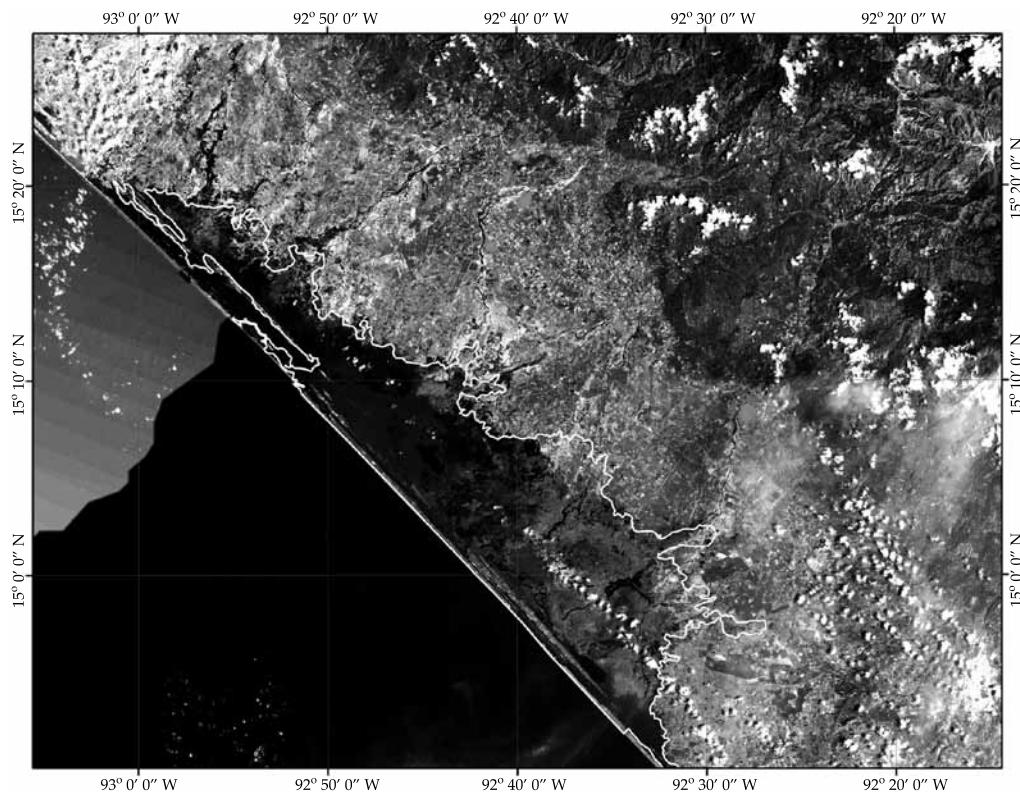


Figura 2. Registro de zonas inundables en la imagen Landsat, comparadas con el perímetro del humedal de INEGI en escala 1:250 000.

correspondientes al límite hidrológico de las subcuenca en la zona de estudio con el mapa del *Inventario Nacional de Humedales* en escala 1:250 000, desarrollado a partir de diferentes capas temáticas: edafología, climatología, hidrología, relieve y regiones ecológicas, empleando un sistema de información geográfica.

Caracterización de los humedales en escala 1:50 000

Para conocer las diferentes coberturas de vegetación y uso del suelo que se desarrollan en los humedales, se obtuvieron del mapa de uso de suelo y vegetación desarrollado inicialmente para caracterizar la zona de estudio y mediante un proceso de recorte y extracción realizado con base en el polígono que delimita la zona de humedales.

Verificación en campo

Una actividad previa a la verificación de campo consistió en el cargado de datos en un equipo de cómputo portátil. Las coberturas a verificar son las correspondientes al perímetro de los humedales, su capa de vegetación y uso de suelo; así como las coberturas de apoyo obtenidas del mapa topográfico digital escala 1:50 000, entre las que destacan las áreas urbanas, localidades rurales, vías de comunicación y toponomía. Se abre un proyecto en un ambiente de mapa móvil donde se organizan y configuran las coberturas cargadas previamente. De manera consensuada con los especialistas que participan en los diferentes temas del proyecto, se identifican y ubican los puntos de interés, de los cuales es necesario obtener sus registros en campo; por último, se realiza el recorrido de campo.

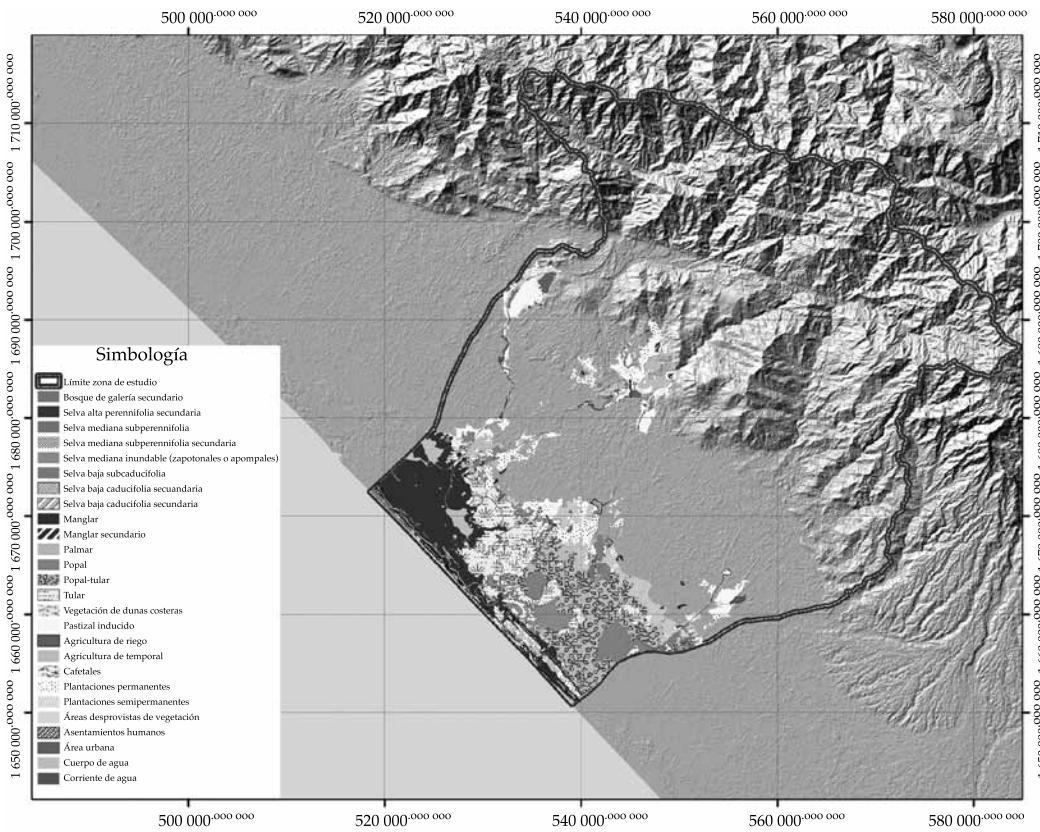


Figura 3. Distribución de los humedales en la zona de estudio y cobertura de vegetación.

Delimitación del perímetro de la zona de humedales escala 1:20 000

Como referente para limitar en escala 1:20 000 el área ocupada por los humedales, se empleó como base el límite obtenido a escala 1:50 000, afinando la delimitación y conservando la coherencia entre ambas escalas, usando los siguientes insumos documentales:

- Cobertura de la *Red Hidrográfica Interconectada* (RHI). Esta cobertura establece un número de orden a cada corriente de la red hidrográfica, que se sobrepone a la imagen de satélite para definir el número de orden de la corriente que cumple con el área mínima de la escala 1:20 000 y de esta manera seleccionar los humedales fluviales a mapear en la escala mencionada.

- Levantamiento de secciones topográficas. Una vez que fueron seleccionadas las corrientes consideradas como humedales fluviales que cumplen con los requisitos de la escala, el siguiente paso fue definir el área de influencia de la superficie hídrica en ambas márgenes de cada corriente con base en su orden, tipo de relieve y posición en la cuenca. Para ello, de las tres cuencas bajo estudio, se seleccionó la cuenca del río Huixtla, por contar con mejores condiciones de acceso para el desarrollo del trabajo topográfico. Los resultados obtenidos sirvieron de base para el dimensionamiento de las superficies de influencia de los humedales y se extrapolaron a las otras cuencas.
- Imagen de satélite de alta resolución. La resolución 2.5 m de las imágenes SPOT 5 resulta indispensable para la caracterización

de los humedales en la presente escala de análisis, pues permite la adecuada interpretación de los diferentes elementos que conforman la superficie delimitada y apoya la clasificación del complejo de humedales (Alonso-EguíaLis *et al.*, 2013).

- d) Mapa de uso de suelo y vegetación escala 1:50 000. En un sistema de información geográfico se sobrepuso la imagen de alta resolución, el perímetro obtenido en escala 1:50 000 y la *Red Hidrográfica Interconectada*, y se determinó el perímetro de la superficie del humedal; se reclasificaron las clases de cobertura vegetal y uso del suelo presentes dentro del polígono (Yang, 2007), para cumplir con los requisitos de la escala 1:20 000. Al final, se revisó el mapa resultante y se incorporó a la base de datos geográfica del proyecto (figura 4).

Uso de suelo y vegetación en la cuenca hidrográfica

El objetivo de este análisis es tener el contexto biofísico y socioeconómico que se manifiesta espacialmente y que permite caracterizar el aprovechamiento retrospectivo, actual y prospectivo de los recursos en cada cuenca, que impactan la salud y permanencia de los humedales en las cuencas bajo estudio. Mediante el procesamiento de las imágenes de satélite se elaboraron los mapas de uso de suelo y vegetación, y se evaluó el estado de la vegetación natural (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010a) presente en la zona de estudio en 1986, 2004 y 2010. Las clases establecidas, superficies y porcentajes de cobertura cuantificados se presentan en el cuadro 2. La figura 5 presenta la distribución de clases de uso de suelo y vegetación obtenida para 2004.

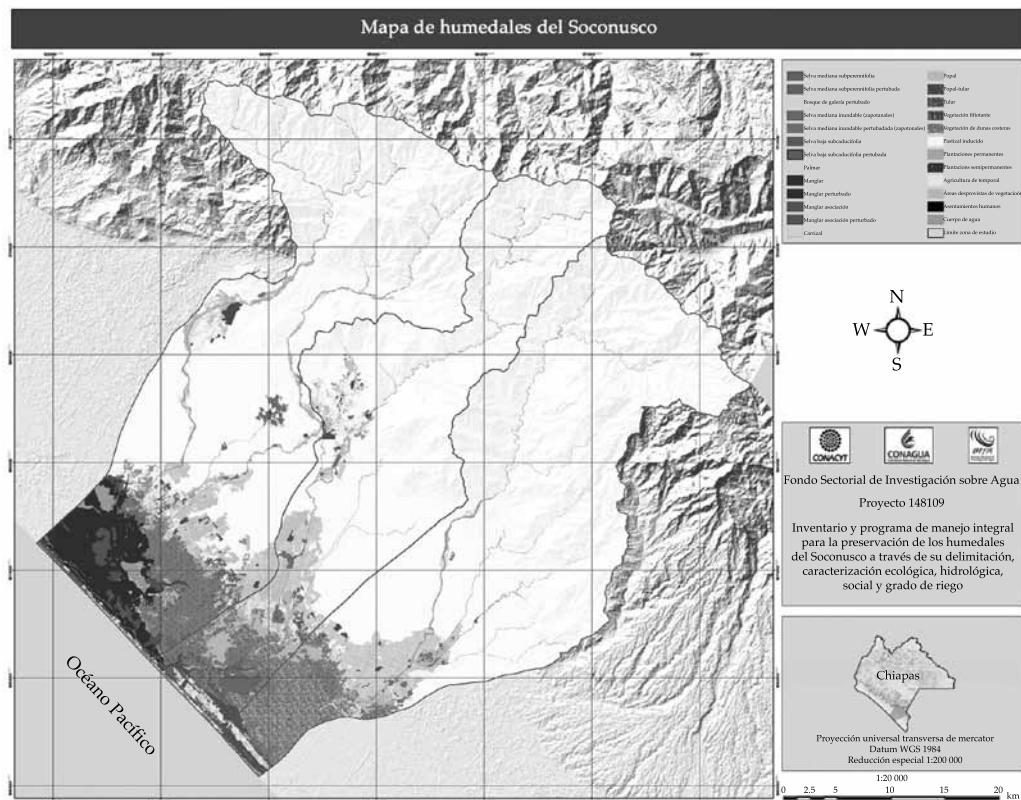


Figura 4. Mapa de los humedales en escala 1:20 000.

Cuadro 2. Superficies por clases cuantificadas para los años 1986, 2004 y 2010.

Clases evaluadas	1986		2004		2010	
	Superficie		Superficie		Superficie	
	ha	%	ha	%	ha	%
Agricultura de riego	1 456	1	1 320	1	2 747	1
Agricultura de temporal	9 885	4	6 039	3	5 791	2
Asentamientos humanos	1 808	1	4 885	2	5 954	3
Bosque de galería	75	0	7	0	6	0
Bosque de galería perturbado	694	0	456	0	606	0
Bosque mesófilo de montaña	7 926	3	4 969	2	2 960	1
Bosque mesófilo de montaña perturbado	13 466	6	14 356	6	14 974	6
Bosque templado	4 654	2	3 664	2	2 433	1
Bosque templado perturbado	11 974	5	10 242	4	10 773	5
Cafetales	31 134	13	33 299	14	40 874	18
Cuerpo de agua	2 835	1	2 674	1	3 579	2
Manglar	7 994	3	8 123	3	7 907	3
Manglar perturbado	1 469	1	541	0	560	0
Pastizal inducido	29 179	13	34 843	15	32 172	14
Plantaciones	44 901	19	49 677	21	50 504	22
Popal	5 541	2	5 139	2	2 650	1
Popal-tular	4 940	2	6 418	3	8 612	4
Selva caducifolia	996	0	607	0	707	0
Selva caducifolia perturbada	4 842	2	4 113	2	3 701	2
Selva perennifolia	2 662	1	1 676	1	1 419	1
Selva perennifolia perturbada	33 183	14	29 649	13	23 743	10
Suelo desnudo	238	0	607	0	1 726	1
Tular	10 543	5	9 088	4	8 001	3
Vegetación de dunas costeras	98	0	99	0	92	0

Después se evaluó la tasa neta de cambio de cobertura de cada clase en el periodo 1986 a 2004, y de 2004 a 2010 por clase, presentados en los cuadros 3 y 4, respectivamente.

Uso prospectivo del suelo

La obtención de la cartografía prospectiva de las áreas de estudio es posible tras la aplicación de los siguientes módulos de análisis: cadenas de Markov y proyección estocástica; evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo; cadenas de Markov acopladas a un algoritmo de automatismo celular (Paegelow, Camacho-Olmedo, & Menor-Toribio, 2003).

Para determinar el uso prospectivo del suelo y la vegetación se aplicó el proceso Ca-Markov, empleando los mapas generados para 1986 y 2010, obteniéndose la distribución potencial de los usos del suelo y la vegetación para el año 2030, periodo establecido en la Agenda del Agua.

El algoritmo utiliza cadenas de Markov que permiten calcular la probabilidad de cambio de una clase a otra con base en la matriz de cambios de un cierto lapso. La idea subyacente es que los cambios observados en un periodo de tiempo tienen tendencia a repetirse en un periodo posterior. Para su aplicación se genera una matriz de transición que toma en cuenta la

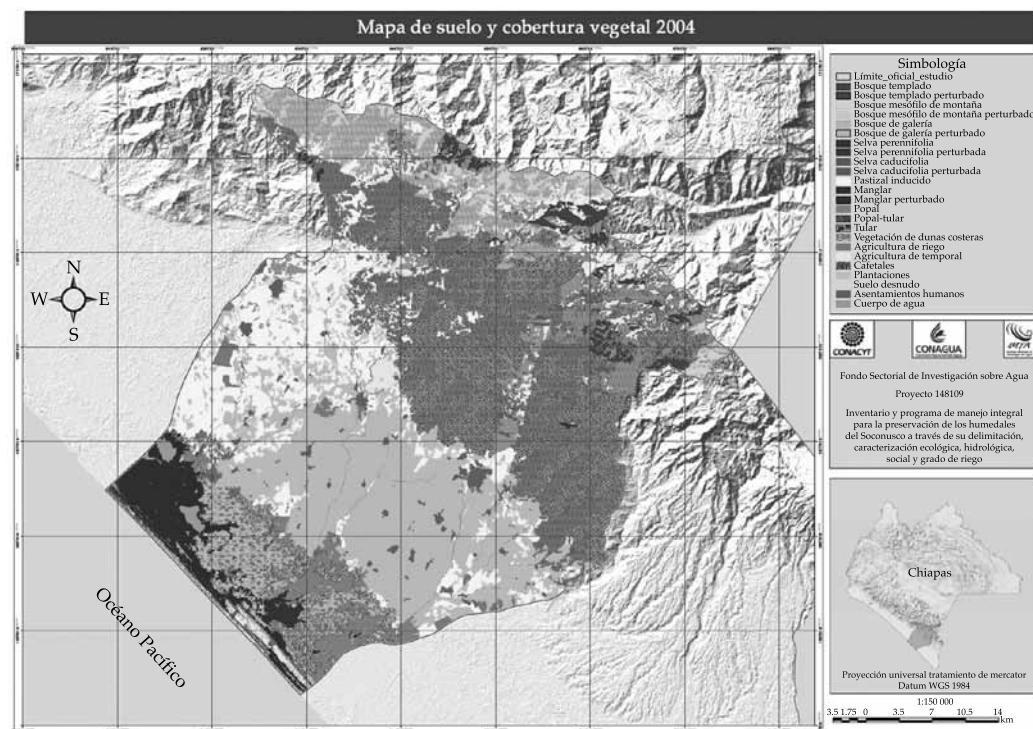


Figura 5. Distribución de clases de uso de suelo y vegetación para 2004.

Cuadro 3. Evaluación de la tasa de cambio en el periodo 1986-2004 por clase.

Clases evaluadas	Superficie (ha)		Tasa neta de cambio (ha)	Tasa anual de cambio (ha/año)	Índice anual de cambio (%)
	1986	2004			
Agricultura de riego	1 456	1 320	-136	-8	-1
Agricultura de temporal	9 885	6 039	-3 846	-214	-2
Asentamientos humanos	1 808	4 885	3 077	171	9
Bosque de galería	75	7	-68	-4	-5
Bosque de galería perturbado	694	456	-238	-13	-2
Bosque mesófilo de montaña	7 926	4 969	-2 957	-164	-2
Bosque mesófilo de montaña perturbado	13 466	14 356	890	49	0
Bosque templado	4 654	3 664	-990	-55	-1
Bosque templado perturbado	11 974	10 242	-1 732	-96	-1
Cafetales	31 134	33 299	2 165	120	0
Cuerpo de agua	2 835	2 674	-161	-9	0
Manglar	7 994	8 123	128	7	0
Manglar perturbado	1 469	541	-928	-52	-4
Pastizal inducido	29 179	34 843	5 664	315	1
Plantaciones	44 901	49 677	4 776	265	1
Popal	5 541	5 139	-402	-22	0

Cuadro 3 (continuación). Evaluación de la tasa de cambio en el periodo 1986-2004 por clase.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio (ha)	Tasa anual de cambio (ha/año)	Índice anual de cambio (%)
	1986	2004			
Popal-tular	4 940	6 418	1 478	82	2
Selva caducifolia	996	607	-389	-22	-2
Selva caducifolia perturbada	4 842	4 113	-730	-41	-1
Selva perennifolia	2 662	1 676	-986	-55	-2
Selva perennifolia perturbada	33 183	29 649	-3 534	-196	-1
Suelo desnudo	238	607	370	21	9
Tular	10 543	9 088	-1 455	-81	-1
Vegetación de dunas costeras	98	99	1	0	0

Cuadro 4. Evaluación de la tasa de cambio en el periodo 2004-2010 por clase.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio (ha)	Tasa anual de cambio (ha/año)	Índice anual de cambio (%)
	2004	2010			
Agricultura de riego	1 320	2 747	1 427	238	18
Agricultura de temporal	6 039	5 791	-248	-41	-1
Asentamientos humanos	4 885	5 954	1 068	178	4
Bosque de galería	7	6	-2	0	-3
Bosque de galería perturbado	456	606	149	25	5
Bosque mesófilo de montaña	4 969	2 960	-2 008	-335	-7
Bosque mesófilo de montaña perturbado	14 356	14 974	618	103	1
Bosque templado	3 664	2 433	-1 231	-205	-6
Bosque templado perturbado	10 242	10 773	531	89	1
Cafetales	33 299	40 874	7 574	1 262	4
Cuerpo de agua	2 674	3 579	905	151	6
Manglar	8 123	7 907	-215	-36	0
Manglar perturbado	541	560	19	3	1
Pastizal inducido	34 843	32 172	-2 671	-445	-1
Plantaciones	49 677	50 504	827	138	0
Popal	5 139	2 650	-2 490	-415	-8
Popal-tular	6 418	8 612	2 194	366	6
Selva caducifolia	607	707	100	17	3
Selva caducifolia perturbada	4 113	3 701	-411	-69	-2
Selva perennifolia	1 676	1 419	-257	-43	-3
Selva perennifolia perturbada	29 649	23 743	-5 905	-984	-3
Suelo desnudo	607	1 726	1 119	186	31
Tular	9 088	8 001	-1 087	-181	-2
Vegetación de dunas costeras	99	92	-7	-1	-1

imagen de un momento inicial (el uso del suelo y vegetación del 1986) y la imagen actual (el uso del suelo y vegetación del 2010). Para cada categoría se calcula la superficie que permanece con el mismo uso del suelo en el lapso considerado y la superficie cuyo uso del suelo cambia a otra categoría. A partir de la matriz de transición, el programa elabora una matriz de probabilidad de cambio entre las 24 clases que fueron establecidas. Las probabilidades de cambio de una clase a otra se obtienen dividiendo la superficie de cambio de una clase a otra por el total de la superficie de la clase en el pasado.

Una vez definidas las superficies para el escenario tendencial a futuro, el programa requiere de elementos para identificar las zonas donde se llevarán a cabo estos cambios. Para cada clase se requiere de un mapa de aptitud, que evalúe la probabilidad de que una clase exista en un punto con base en las características de este punto.

La distribución potencial de los usos del suelo y la vegetación para 2030, obtenida al aplicar el proceso Ca-Markov, se presenta en la figura 6 y en el cuadro 5 se tiene la distribución potencial de las superficies agrupadas en tipos generalizados de vegetación, en donde se detecta el incremento de los usos de suelo agropecuario, a costa de la pérdida de coberturas de vegetación natural.

De acuerdo con los datos obtenidos, se mantiene una tendencia descendente de las superficies correspondientes a clases de vegetación natural, principalmente de las selvas, bosques y vegetación hidrófita, lo cual puede apreciarse con claridad en el gráfico de tendencia ilustrado en la figura 7; mientras que las coberturas relacionadas con actividades agropecuarias presentan tendencia a incrementarse (figura 8).

El análisis espacial del aprovechamiento de los recursos naturales en la cuenca permitió observar una fuerte presión directa e indirec-

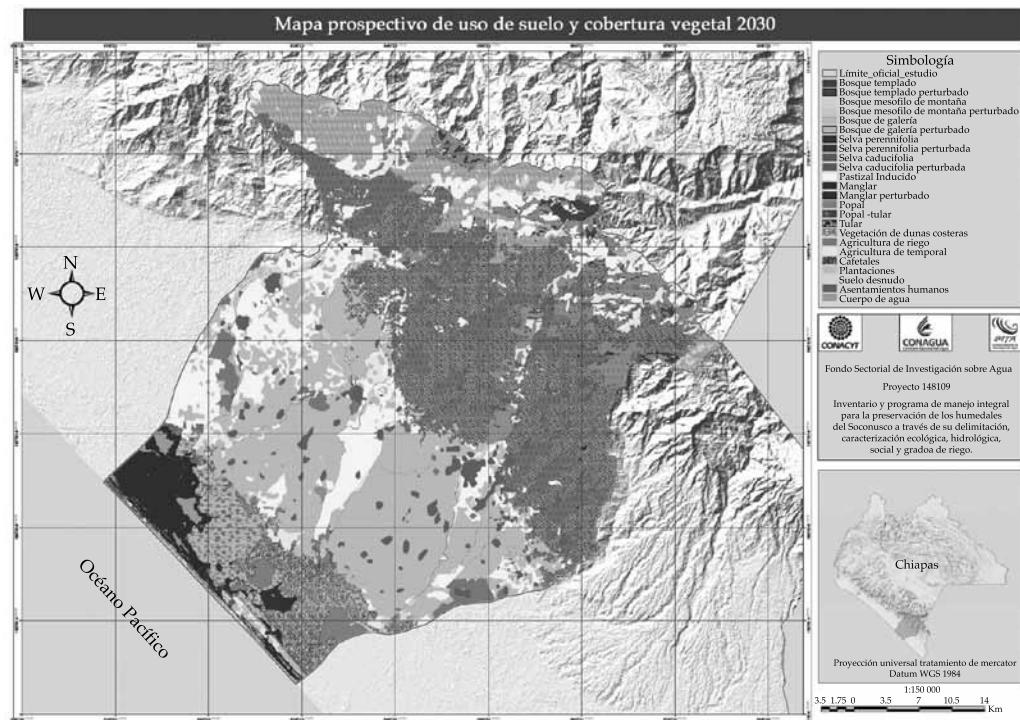


Figura 6. Distribución espacial de coberturas de vegetación y uso de suelo para 2030.

Cuadro 5. Superficie evaluada por clase y tasa de cambio en el periodo.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio	Tasa anual de cambio	Índice anual de cambio
	2010	2030	(ha)	(ha/año)	(%)
Agricultura de riego	2 747	3 245	498	25	1
Agricultura de temporal	5 791	4 691	-1 100	-55	-1
Asentamientos humanos	5 954	9 065	3 111	156	3
Bosque de galería	6	5	-1	0	-1
Bosque de galería perturbado	606	560	-45	-2	0
Bosque mesófilo de montaña	2 960	1 534	-1 426	-71	-2
Bosque mesófilo de montaña perturbado	14 974	15 039	65	3	0
Bosque templado	2 433	1 626	-807	-40	-2
Bosque templado perturbado	10 773	8 914	-1 859	-93	-1
Cafetales	40 874	41 929	1 055	53	0
Cuerpo de agua	3 579	3 724	145	7	0
Manglar	7 907	7 406	-501	-25	0
Manglar perturbado	560	436	-124	-6	-1
Pastizal inducido	32 172	32 507	334	17	0
Plantaciones	50 504	52 516	2 012	101	0
Popal	2 650	2 315	-335	-17	-1
Popal-tular	8 612	8 654	42	2	0
Selva caducifolia	707	418	-289	-14	-2
Selva caducifolia perturbada	3 701	3 266	-435	-22	-1
Selva perennifolia	1 419	876	-543	-27	-2
Selva perennifolia perturbada	23 743	22 230	-1 513	-76	0
Suelo desnudo	1 726	2 305	579	29	2
Tular	8 001	7 033	-968	-48	-1
Vegetación de dunas costeras	92	207	115	6	6

ta sobre los sistemas acuáticos. En el caso de afectación directa, se detectó una reducción de la superficie del humedal mediante el drenado de áreas y cambio de uso de suelo, y como afectaciones indirectas se encontró que gran parte de los aprovechamientos realizados tanto en la cuenca alta, media y baja no son compatibles ecológicamente con la vocación del suelo, lo que da origen en la cuenca alta a un proceso de deslizamiento y erosión del suelo, cuyos sedimentos se depositan en especial en la zona de humedal costero ubicado en la cuenca baja,

deteriorando de modo continuo las condiciones del hábitat acuático.

Conclusiones

El empleo de información hidrometeorológica aplicada a la selección de imágenes satelitales, y en el análisis de la distribución y comportamiento de las zonas sujetas a inundación mejoraron de forma sustancial la delimitación de los humedales palustres y fluviales ubicados en zonas con reducida pendiente, en particular

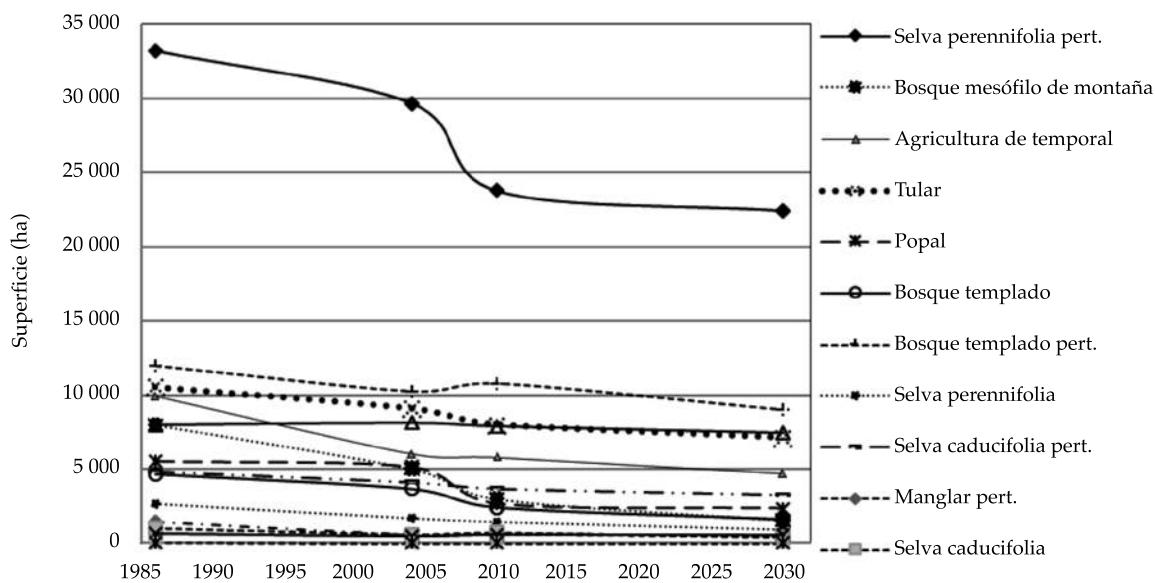


Figura 7. Coberturas de vegetación con tendencia a reducirse.

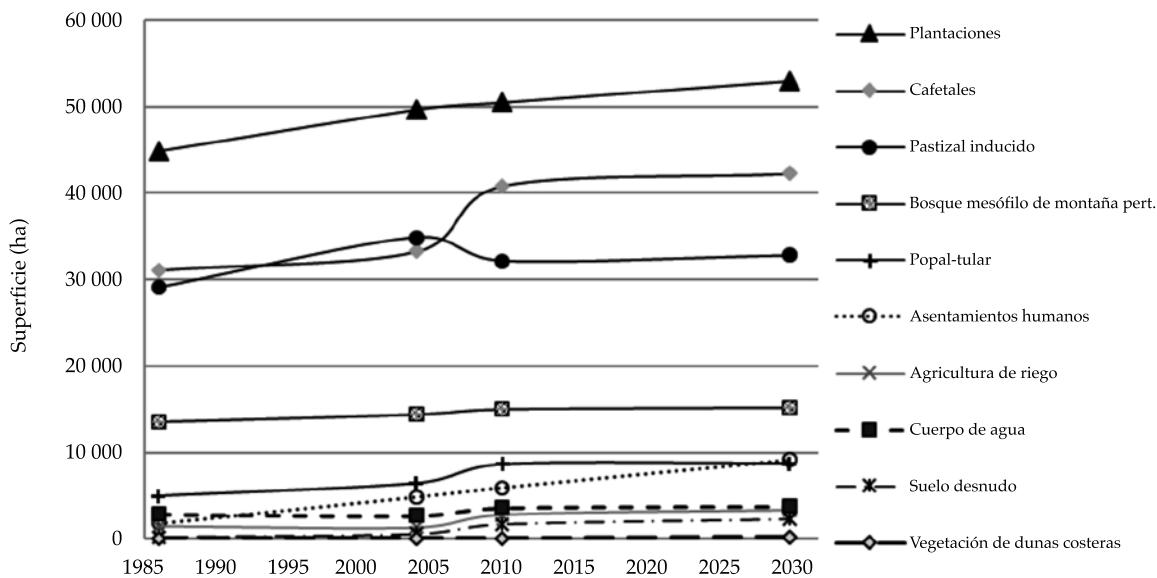


Figura 8. Coberturas con tendencia a incrementarse.

en la cuenca baja de los ríos; esto, al comparar los límites obtenidos con los mapas elaborados por el INEGI (2007) y por la Conagua-UNAM (González, 2012); además se favorece la con-

gruencia de su representación cartográfica en cada cambio de escala.

El trabajo de campo, y de manera particular el levantamiento jerárquico selectivo de

secciones topográficas de cauces, permitieron establecer criterios para una adecuada selección de las corrientes a cartografiar, así como el dimensionamiento del área de influencia de los humedales fluviales en escala 1:20 000, lo que constituye un aporte original del presente trabajo a los procedimientos realizados en México para la delimitación de los humedales fluviales.

Este tipo de estudios permite dimensionar, delimitar y caracterizar las zonas ocupadas por humedales; asimismo, proporcionan la información de apoyo necesaria para el planteamiento de acciones y programas para el uso y manejo sustentable de los recursos naturales, y de la riqueza y biodiversidad disponible en los humedales y en las cuencas hidrográficas.

Referencias

- Alonso-EguíaLis, P., Brena, J., Castillo, C., Martínez, M., Sánchez, E., Vara, E., Ramírez, V., Mirén, V., Álvarez, J., Surre, P., Olea, S., Espinoza, E., Rioja, T., Rojas, A., Del Carpio, C., Sánchez, S., Carrillo, A., López, S., Pérez, M., Gómez, H., Gómez., & L. Vera, J. (2013). *Inventario y programa de manejo integral para la preservación de los humedales del Soconusco a través de su delimitación, caracterización ecológica, hidrológica, social y grado de riesgo* (491 pp.). México, DF: Fondo de Investigación sobre Agua, Conacyt-Conagua.
- Conagua (2012). *Inventario Nacional de Humedales*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=4&n2=180&n3=180>.
- FAO (2007). *The World's Mangroves 1980-2005*. Rome: FAO Forestry Paper. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1427e/a1427e00.pdf>.
- González, F. (2012). *Estudio interdisciplinario de los humedales de la república mexicana: inventario, metodología y su validación a nivel piloto* (33 pp.). México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- INEGI (2006). *Manual descriptivo humedales potenciales de México*. México, DF: INEGI, Dirección General de Geografía, 50 pp.
- INEGI (2007). *Cartografía de humedales potenciales de México. Continuo Nacional Primera Edición escala 1:250,000*. Aguascalientes, México: INEGI.
- INEGI (2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica interconectada escala 1:50,000* (105 pp.). Aguascalientes, México: INEGI, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.
- Moreno-Casasola, P., Brena, J., Alonso-EguíaLis, P., Acosta, I., Campos, A., Capistrán, A., Castillo, C., Díaz C., Damian, M., Del Río, M., Infante, D., Fernández, A., Flores, M., Gutiérrez, C., Isunza, E., Landgrave, R., López, E., López, H., Madero, C., Mateos, A., Martínez M., Maya, E., Monroy, R., Olvera, E., Pale, J., Paradowska, K., Priego, A., Salcedo, E., Sánchez, E., Sánchez, J., Velázquez, J., & Zavala, J. (2009). *Inventario, delimitación, caracterización y uso sustentable de los humedales de la cuenca del río Papaloapan*, México (525 pp.). México, DF: Fondo de Investigación sobre Agua, Conacyt-Conagua.
- Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M. T., & Menor-Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, GeoFocus*, 3, 22-44.
- Secretaría de la Convención de Ramsar (2010a). *Manual 9: manejo de cuencas hidrográficas* (93 pp.). (4a. edición). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Secretaría de la Convención de Ramsar (2010b). *Manual 15: inventario de humedales* (83 pp.) (4a. edición). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Semarnat (2008). *Documento estratégico rector del inventario nacional de humedales* (57 pp.). México, DF: Semarnat.
- Stolk, M. E., Verweij, P. A., Stuip, M., Baker, C. J., & Oosterberg, W. (2006). *Valoración socioeconómica de los humedales en América Latina y el Caribe*. Los Países Bajos: Wetlands International.
- Yang, X. (January 2007). Integrated Use of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Riparian Vegetation Delineation and Mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 28(2), 353-370.

Dirección institucional de los autores

Geog. Jorge Brena

Ing. Cervando Castillo

Ing. Ana Wagner

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso

62550 Jiutepec, Morelos, México

Teléfono: + 52 (777) 3293 600, extensiones 863, 104 y 530

jbrena@tlaloc.imta.mx

cervando@tlaloc.imta.mx

awagner@tlaloc.imta.mx