



Gaceta Ecológica

ISSN: 1405-2849

gaceta@ine.gob.mx

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos
Naturales
México

Pérez-Maqueo, Octavio; Delfín, Christian; Fregoso, Alejandra; Cotler, Helena; Equihua, Miguel
Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales
hídricos

Gaceta Ecológica, núm. 78, 2006, pp. 65-84
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907805>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos

OCTAVIO PÉREZ-MAQUEO,* CHRISTIAN DELFÍN,*
ALEJANDRA FREGOSO,* HELENA COTLER** Y MIGUEL EQUIHUA*

* Instituto de Ecología A.C., Xalapa Apartado Postal 63, 91000 Xalapa, Veracruz.

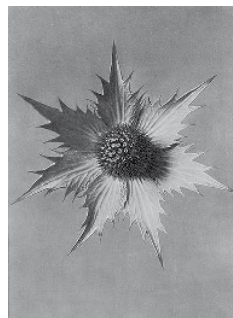
** Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT.

Resumen: Este trabajo propone un marco conceptual para mejorar el diseño y la evaluación del Programa de pago por servicios ambientales hidrológicos en México. Se basa en un enfoque sistémico para apoyar la formulación explícita de un modelo teórico de los procesos subyacentes a la prestación de los servicios ambientales hidrológicos, que son el foco de uno de los esquemas de pago que actualmente opera la Comisión Nacional Forestal.

Palabras clave: funciones de los ecosistemas, modelado y toma de decisiones, predicción, escenarios, capital natural, pago por servicios ambientales, programas de cómputo

Abstract: *This work proposes a conceptual framework to improve the design and the evaluation of the Payment for Environmental Hydrological Services in Mexico. It is based on a systematic approach to support the explicit formulation of a theoretical model of the underlying processes to the benefit of the hydrological environmental services, that are the center of one of the payment schemes of the Comisión Nacional Forestal.*

Keywords: *ecosystem functions, modeling and decision making, prediction, scenarios, natural capital, payment for environmental services, software*



INTRODUCCIÓN

Actualmente, el tema de la valoración económica de los servicios ambientales es de gran interés en México y el mundo. La preocupación sobre cómo internalizar el capital natural que condiciona las actividades productivas y el bienestar de la sociedad es un tema central en la búsqueda de un desarrollo sustentable. En nuestro país, la ruta de acción que se está transitando

hoy en día es la valoración de los servicios ecológicos y la generación de políticas públicas conducentes a su preservación y restauración.

Recientemente se han iniciado varios programas de pago por servicios ambientales (PSA) en distintas partes del mundo (FAO 2004, Pagiola *et al.* 2003). Estos programas tienen como objetivo promover el manejo

sustentable de los servicios ambientales mediante incentivos económicos. México cuenta desde el 2003 con un programa de Pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH) y en octubre de 2004 se inició el programa de Pago de servicios ambientales (PSA) para la captura de carbono y la protección de la biodiversidad que, además, apoya la reconversión a sistemas agroforestales y el mejoramiento de sistemas agroforestales preexistentes (www.conafor.gob.mx, D.O.F. 2004).

En estos programas se reconoce que los bosques y las selvas proporcionan servicios ambientales de distinta naturaleza.¹ En particular, por medio del PSAH el gobierno mexicano busca atender los problemas de agua y deforestación en el país. Además, se plantea el interés de generar un mercado de cobro y pago de servicios ambientales, haciendo que los gobiernos locales y organismos operadores de agua potable tomen la estafeta del programa (www.conafor.gob.mx) y puedan, con objetividad, incorporar la dimensión ambiental en su lógica de producción y operación. Para ello es importante contar con un programa de PSAH flexible que pueda modificarse, adaptarse o afinarse en función de la experiencia que se tenga tanto de éste como de otros esquemas similares, así como del mejoramiento que se obtenga de los procesos ecológicos involucrados en la generación y preservación de dichos servicios.

Experiencias previas al PSAH en México han mostrado que el diseño de los programas de PSA juega un papel central para garantizar su éxito. En un estudio realizado para la Comisión de Cooperación Ambiental de Norteamérica, Mayran y Paquín (2004) evaluaron 25 esquemas de PSA y encontraron que estos tienden a trabajar mejor cuando:

- § Están basados en evidencia científica clara y consensuada que relaciona los usos del suelo y la provisión de servicios.
- § Definen claramente los servicios que serán provistos.

- § Los contratos y los pagos son flexibles, continuos y sin restricciones.
- § Los costos de transacción no exceden los beneficios potenciales.
- § Se apoyan en fuentes de ingresos múltiples que aportan un flujo de dinero suficiente y sostenible en el tiempo.
- § Los cumplimientos, los cambios en los usos del suelo y la provisión de servicios son cuidadosamente vigilados, y
- § Son lo suficientemente flexibles para permitir ajustes que mejoren su efectividad y eficiencia así como su adaptación a condiciones cambiantes.

Trabajos anteriores indican que los esquemas de PSA requieren de la atención de varios aspectos. De lo contrario, los resultados pueden no corresponder a las predicciones planteadas y en ocasiones incluso ser contraproducentes. Ejemplo de esto son las conclusiones publicadas por la FAO (2004) y que muestran que para algunos casos, los PSA no son el método más rentable para lograr los objetivos planeados o incluso pueden generar incentivos perversos o desplazar problemas ambientales a otros sitios (cuadro 1).

Ante esta situación, Senge y Sterman (1994) sostienen que en muchas ocasiones los resultados contra intuitivos son producto de las limitaciones de nuestros modelos mentales al enfrentarnos a sistemas complejos, dado que los procesos de realimentación entre variables, las relaciones no lineales y el retraso en los tiempos de respuesta pueden rebasar nuestra capacidad de entendimiento. Para Van den Belt (2004) es necesario utilizar herramientas que nos permitan analizar las consecuencias de nuestras políticas de manejo. Una de éstas es la construcción explícita de modelos de simulación (Senge y Sterman 1994). Por un lado, el proceso de construcción de los modelos explícitos tiene como principal atributo enriquecer las abstracciones que

CUADRO 1. DIFICULTADES DE EXPERIENCIAS PREVIAS EN OTROS PROGRAMAS DE PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES

§	Se basan en generalizaciones no corroboradas por enfoques empíricos sobre la relación entre el uso de la tierra y el servicio hídrico.
§	No constituyen el método más rentable para lograr los objetivos planteados.
§	Los proveedores, los usuarios y el servicio no están bien identificados.
§	Han sido ejecutados en ausencia de un mecanismo de seguimiento o fiscalización.
§	El modelo y el costo del servicio fueron impuestos políticamente y no responden a estudios sobre la demanda o la valorización económica del recurso.
§	El diseño no ha sido respaldado por estudios socioeconómicos o biofísicos previos.
§	Pueden constituir incentivos perversos o desplazar problemas ambientales o usos del suelo insostenible a zonas aledañas.
§	Poseen una alta dependencia de recursos financieros externos.
§	Los programas y actividades han sido poco difundidos entre la población local.

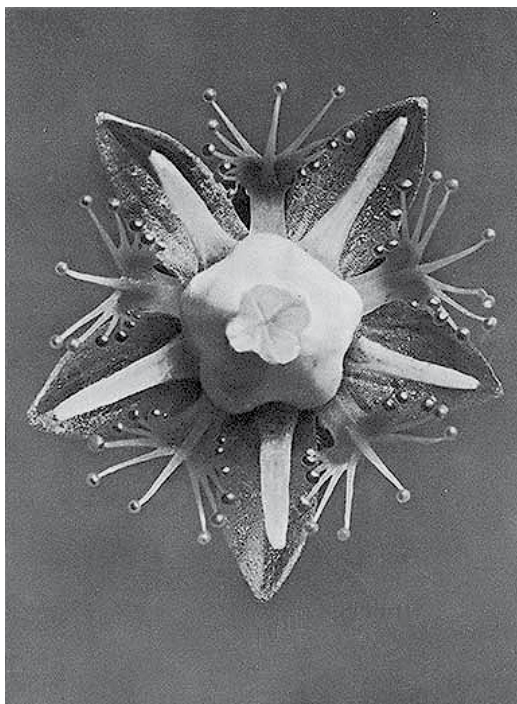
Fuente: FAO (2004).

el ser humano construye en su mente sobre la forma en que opera algún fenómeno del mundo real. Por otra parte, la simulación es una manera de probar y refinar los resultados de estas abstracciones y por lo tanto, también suelen modificar nuestros modelos mentales (Equihua y Pérez-Maqueo 2004). Entre otras cosas, el enfoque basado en la construcción de modelos es útil para planear, organizar y modificar los programas de PSA de manera sistemática; además, permite detectar huecos de información, facilita la comunicación interdisciplinaria y favorece el planteamiento de nuevas preguntas sobre el tema (Pérez-Maqueo *et al.* 2001, Dale 2003, Haefner 1996, van Den Belt 2004).

En este contexto, el presente estudio propone un marco conceptual para mejorar el diseño y la evaluación del Programa de pago por servicio ambientales hidrológicos en México.² Este estudio se basó en un enfoque sistémico para apoyar la formulación explícita de un modelo teórico de los procesos subyacentes a la prestación de los servicios ambientales hidrológicos,

que son el foco de uno de los esquemas de pago que actualmente opera la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en primer lugar se presentan algunos puntos importantes a considerar con respecto al uso de modelos de simulación para la toma de decisiones; posteriormente, se mencionan los aspectos operativos del PSAH en México y se sitúa el modelo dentro del marco conceptual para servicios ambientales propuesto por De Groot *et al.* (2002); específicamente se identificó la combinación de variables biofísicas que tiene mayor efecto en la infiltración, la retención y el almacenaje de agua. En tercer lugar se explica con detalle el modelo para el filtrado, retención y almacenaje de agua y se identificaron los métodos y sus respectivas fuentes de información para su evaluación en México.³ Finalmente se realiza una discusión amplia sobre la pertinencia de la utilización de los modelos en general y para la toma de decisiones en particular.



LOS MODELOS DE SIMULACIÓN EXPLÍCITOS PARA LA TOMA DE DECISIONES

¿QUÉ SON LOS MODELOS Y PARA QUÉ SE USAN?

Si bien el uso principal de los modelos es comunicar un punto de vista sobre el mundo, no son la realidad, y en el mejor de los casos resultan sólo una aproximación a ésta. No obstante esta última característica, muchos de ellos son útiles para entender un problema en particular o para predecir el comportamiento de un sistema. En cualquiera de los dos casos, el usuario debe estar consciente de estas limitaciones.

En la investigación científica, los modelos se usan principalmente para entender tanto el mundo real como la estructura lógica de un sistema abstracto, como lo es una teoría científica. También se utilizan para predecir el estado futuro al que podría llegar un proceso dinámico dado. Otra aplicación se relaciona con el “control”, es decir, la intervención, manipulación o constricción guiada del comportamiento

de un sistema con el fin de producir una condición deseada. Todo lo anterior depende de la información disponible que se tenga sobre los impulsos del sistema, sus respuestas y funcionamiento. Además del uso de los modelos para interpretar la complejidad de una situación, en ocasiones se pueden extrapolar los resultados a escalas espaciales o temporales mayores o niveles de organización más altos. Los modelos de los tomadores de decisión difieren de los destinados a la investigación porque su propósito o función también es diferente. Mientras que los primeros se van primordialmente para explicar el comportamiento observado (contrastación de hipótesis) usan los modelos de manejo se requieren para la predicción del efecto de la manipulación del sistema, con un grado específico de incertidumbre. Debe notarse que en ambos casos reflejan los acuerdos logrados en la comprensión de un fenómeno, por lo que pueden concebirse como producto concreto de los procesos de consenso.

Existen varias formas de utilizar modelos de simulación para atender un problema en particular. Una de ellas es utilizar programas de cómputo donde previamente se han construido modelos, lo que tiene la ventaja de solucionar un problema concreto mediante la estimación de los parámetros de las ecuaciones sobre las que se basa dicho modelo. Es común que estos programas tengan una documentación detallada que explica cómo operarlos, y las ventajas que ofrecen los hacen muy atractivos. Sin embargo, también se presentan desventajas y es común que se abuse de ellos al no considerar los supuestos y las limitantes de aplicación (May 2004). Por otro lado, las respuestas que dan estos programas a preguntas específicas pueden ser sólo parte del problema, en donde las variables pueden estar inmersas en una red de interacciones con otras variables no consideradas. De ser así, conocer los valores numéricos o cualitativos a través de estos modelos puede dar respuesta solamente a los síntomas del problema real. En otras palabras, existen situaciones donde el

modelo no existe y por lo tanto hay que crearlo, lo que desde nuestro punto de vista significa generar las ecuaciones que lo representan. Para ser precisos cabe señalar que estos se crean generalmente mediante la integración de otros modelos y con frecuencia, su construcción es menos amigable que la aplicación de uno ya existente. Sin embargo, estar involucrado desde la concepción y la construcción del modelo favorece el entendimiento de un problema en particular. En este estudio se eligió utilizar un programa que permite utilizar modelos previamente contruidos que también son lo suficientemente flexibles para modificarlos o crear nuevos componentes.

¿CÓMO CALIFICAR LA VALIDEZ DEL MODELO?

En términos estrictos, la verificación y la validación de los modelos de los sistemas naturales es imposible (Orestes *et al.* 1994). Esto se debe a que los sistemas naturales son abiertos y los modelos se enfocan a un pequeño subconjunto de los muchos procesos que pueden estar desarrollándose. Para ello los modelos se basan en supuestos y en “ideales” que ayudan a construir de las teorías: resortes sin fricción en física, gases ideales en fisicoquímica, mercados perfectos en economía, por mencionar sólo unos cuantos ejemplos. En todo caso, los modelos se pueden confirmar mediante la demostración de que existe concordancia entre las observaciones y la predicción, pero esta confirmación es inherentemente parcial (Orestes *et al.* 1994). *No obstante lo anterior, las políticas se aplican y las decisiones se toman y en este escenario, los modelos aún con toda su imperfección, son útiles para asistir en el proceso.* Una vez aceptado que los modelos sólo se pueden evaluar en términos relativos y que su capacidad predictiva está siempre puesta en duda podemos presentar algunas definiciones operativas. La verificación de un modelo es la demostración de que el formalismo del modelo es correcto, es decir, los códigos del programa de cómputo o las matemáticas

son mecánicamente correctos. La calibración es la estimación y ajuste de los parámetros del modelo y de las constantes para mejorar la concordancia entre la salida del modelo y un conjunto de datos. Para probar un modelo hay que generar predicciones y contrastarlas con un conjunto de datos. La validación es una demostración de un modelo dentro de su dominio de aplicabilidad y posee un intervalo de confianza consistente con la aplicación que se le intenta dar a aquél. Esta demostración indica que el modelo es aceptable para su uso, pero no que resulte una verdad absoluta o que sea el mejor modelo disponible. La validación involucra una comparación de datos simulados, con datos obtenidos por observación y medidas del sistema real de interés (Rykiel 1996).

Finalmente, el interés por el uso que se le da a los modelos dentro de la toma de decisiones se ha ampliado en los últimos años. *Hoy en día, el manejo de los recursos naturales exige que el análisis de un problema determinado se realice integrando un enfoque multidisciplinario.* Risbey *et al.* (1996) señalan que la conexión de la representación matemática de diferentes componentes de sistemas naturales y sociales en un modelo de simulación es una forma mediante la cual se puede realizar dicha integración. Así, los modelos tradicionales están siendo reemplazados con aquellos que incorporan componentes humanos que facilitan la generación de escenarios y funciones de apoyo a las decisiones. *La visión holística de este enfoque incrementa la complejidad de los modelos y hace más difícil que los resultados coincidan con los registros históricos.* En estos casos, el aumento de la incertidumbre exige incorporar un proceso continuo de *monitoreo a largo plazo*, a fin de corroborar, y si se requiere, adaptar el modelo planteado.

Bajo esta realidad, ha sido necesario calificar la calidad de un modelo no sólo como una función de su aproximación al comportamiento en contraste con el observado en el sistema real y la solidez de las hipótesis que los sostiene, sino también por el

propósito particular para el cual es construido (Puccia y Levins 1985, Nichols 2001). *Entre estos otros usos están: identificar áreas de ignorancia, complementar la información existente, organizar o coordinar la investigación empírica, diseñar experimentos, tomar datos de campo o asignar óptimamente el presupuesto de alguna investigación.*

El modelo que se presenta en este artículo fue armado en Stella, a partir de una modificación al construido por Voinov *et al.* (2004). Para este proyecto fue necesario profundizar en sus ecuaciones y supuestos con el fin de modificarlo de acuerdo con las condiciones particulares de México, con lo que se ganó en términos de entendimiento y de flexibilidad. La razón principal por la cual se eligió esta aproximación tiene que ver con las posibilidades de crecimiento de este tipo de modelos a futuro.

Otra característica del lenguaje de cómputo utilizado en la construcción del modelo, y que lo hace atractivo para el PSAH, es su capacidad modular.

Un módulo es un conjunto de fuentes de códigos de computadora que pueden simular procesos de manera independiente o unirse a otros que sean de interés para el usuario. Con esta estructura es posible que el usuario construya modelos que se ajusten a sus necesidades particulares acoplando submodelos disponibles en una librería o generando nuevos componentes cuando esto sea necesario. El modelo que se presenta en este trabajo sería entonces uno de los componentes de esta librería y estaría ligado a otros relacionados con la oferta y demanda de servicios ambientales.

EL PROGRAMA DE PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS (PSAH) EN MÉXICO

El PSAH mexicano acota como servicios ambientales hidrológicos a aquellos que brindan los bosques y selvas y que inciden directamente en el mantenimiento de la capacidad de recarga de los mantos acuíferos,

CUADRO 2. PREMISAS DEL PROGRAMA DE SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS

§	El programa está orientado a conservar los bosques no comerciales importantes para la capacidad de recarga de acuíferos y la protección de las cuencas hidrológicas.
§	Da prioridad a los bosques protegiendo acuíferos sobreexplotados y cuencas con alta escasez de agua o alta frecuencia de desastres naturales en eventos de precipitación extrema.
§	Establece acuerdos anuales con propietarios forestales individuales o colectivos, renovables hasta por cinco años.
§	Se paga por resultados. Sólo se entregan los pagos después de verificar que no hubo deforestación en las áreas forestales acordadas. Si no se cumple no se paga.
§	Se pagan anualmente \$300 por hectárea en todos los bosques o selvas, excepto en el caso de los bosques mesófilos de montaña, los cuales reciben a \$400 por hectárea.
§	Está financiado con el destino específico de una porción de la recaudación federal por concepto de aprovechamiento de los cuerpos de agua de la nación.
§	Busca dar prioridad a los bosques y selvas en más riesgo de deforestación, y no cubiertos ya por otro tipo de apoyos al uso sustentable de recursos madereros.

Fuente: Muñoz *et al.* (2004).

el mantenimiento de la calidad de agua, la reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo, la reducción de las corrientes durante los eventos extremos de precipitación, la conservación de manantiales, el mayor volumen de agua superficial disponible en época de secas y la reducción del riesgo de inundaciones. Mediante el PSAH se paga a los beneficiarios, dueños o legítimos poseedores de terrenos con recursos forestales, por los servicios ambientales hidrológicos que presta el buen estado de conservación de sus bosques y selvas (D.O.F. 2004a). El cuadro 2 presenta los puntos básicos del programa.

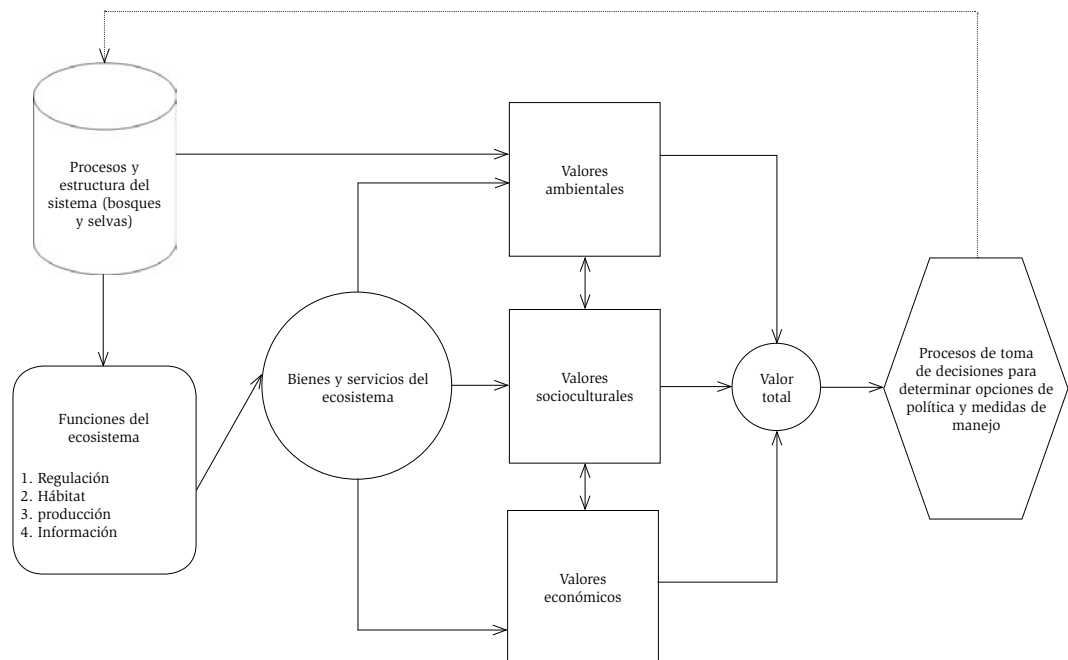
Los propietarios de los predios que se ven favorecidos con este programa están obligados, entre otras cosas, a mantener el uso de suelo y la cobertura forestal de los predios en la extensión y ubicación acordadas en la carta de adhesión durante el plazo que se marca en la misma, incluyendo los predios bajo manejo forestal maderable. De esta manera, se

parte del supuesto que la provisión de servicios ambientales está relacionada con la cobertura forestal de los predios de bosques y selvas. Para verificar que el dueño del predio cumple con su obligación se evalúa el estado de conservación de la cobertura arbórea a través de imágenes satelitales o fotografías aéreas digitales con una antigüedad no mayor a un año y con resolución de por lo menos 5 m² por pixel (artículo 9 del Acuerdo D.O.F. 2004a).

EL MARCO CONCEPTUAL DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES

La implementación de un esquema de pago por servicios ambientales debe basarse en un marco conceptual (figura 1) que permita identificar los principales procesos que suceden en los ecosistemas, y que se postula que proveen los diferentes servicios. En este sentido, De Groot *et al.* (2002) proponen un marco conceptual que permite clasificar, describir

FIGURA 1. ESQUEMA CONCEPTUAL SOBRE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES



Fuente: modificado a partir de De Groot *et al.* 2002.

y valorar las funciones, los bienes y los servicios de los ecosistemas.

Bajo este marco, de acuerdo con De Groot (1992), se definen como funciones del ecosistema a “*la capacidad de los procesos naturales y componentes para proveer bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas, directa o indirectamente*”. Cada función es el resultado de los procesos naturales del subsistema ecológico del cual es parte. Por otro lado, los procesos naturales son el resultado de interacciones complejas entre componentes bióticos y abióticos de ecosistemas a través de fuerzas universales de control de materia y energía (cuadro 3).

Las funciones de los ecosistemas de regulación, hábitat, producción e información generan el conjunto de servicios y bienes ambientales que pueden ser valuados desde distintos enfoques (ecológico, socio-cultural y económico) y que determinan los procesos de toma de decisión. Bajo el marco conceptual de De Groot *et al.* (2002), el PSAH queda incluido como una

de las opciones de política y medida de manejo. La repercusión de esta política (como de cualquier otra) tiene efectos no sólo en las funciones del ecosistema que generan los servicios ambientales y que serían las que interesan al PSAH sino en otros procesos y estructuras del sistema. Por definición, construir un modelo para todo el sistema es imposible y en el mejor de los casos podemos proyectar el efecto de estas políticas en algunos de sus componentes y procesos. Las preguntas que se deseen contestar y los objetivos del trabajo determinarán cuáles serán los conceptos y procesos que se integrarán en el o los modelos de simulación.

Obviamente, modelar los procesos de las funciones del ecosistema que generan los servicios ambientales por los cuales paga el PSAH es uno de los temas de interés. No obstante, otros temas interesantes también pueden ser abordados bajo este esquema de modelación, entre los que se encuentran: optimizar los recursos para la operación del programa, entender

CUADRO 3. FUNCIONES DEL ECOSISTEMA Y LOS BIENES Y SERVICIOS QUE PRESTAN

FUNCIONES	COMPONENTES Y PROCESOS DEL ECOSISTEMA	BIENES Y SERVICIOS
Funciones de regulación	Mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales y de los sistemas de soporte de vida Filtrado, retención y almacenaje de agua dulce (por ejemplo, en acuíferos).	§ Mantenimiento de la capacidad de recarga de los mantos acuíferos
		§ Mantenimiento de la calidad de agua
		§ Conservación de manantiales
		§ Mayor volumen de agua superficial disponible en época de secas
Prevención de disturbios	Influencia de la estructura del ecosistema en el amortiguamiento de disturbios ambientales.	§ Reducción de las corrientes durante los eventos extremos de precipitación
		§ Reducción del riesgo de inundaciones
Retención de suelo	Papel de la matriz de raíces y biota en la retención del suelo.	§ Reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo

cuáles son los factores que influyen en la decisión de los dueños de los predios para anexarse al PSAH o instrumentar un mercado de servicios ambientales.

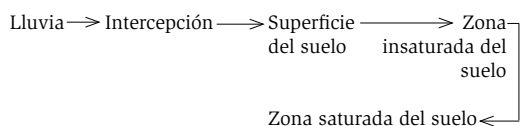
MODELO FILTRADO, RETENCIÓN Y ALMACENAJE DE AGUA

Una de las ideas sobre la cual se basa el PSAH en México es que la conservación de bosques y selvas favorece los procesos de filtrado, retención y almacenaje de agua, lo que incrementa la oferta de bienes y servicios relacionados. Al respecto, existe el acuerdo en que estos procesos dependen de factores que varían espacial y temporalmente como: la pendiente del sitio, las características y composición del suelo, las especies de árboles, los tipos de vegetación, el clima y los regímenes de manejo, entre otros. Obviamente, la inversión para instrumentar y medir el efecto de estos factores en los procesos ecosistémicos es elevada. Bajo este escenario y considerando además la resolución espacial y temporal que exige el PSAH, resulta muy difícil hacer predicciones sobre la cantidad de agua que se filtra, retiene o almacena. No obstante, simular estos procesos y el efecto de estos factores con base en modelos teóricos y métodos de evaluación consensuados puede ser de utilidad en varios sentidos. En primer lugar, nos permite explicar con base en el conocimiento actual cómo operan los procesos de filtrado, retención y almacenaje. La simulación permite formular hipótesis sobre el efecto relativo que tiene cada una de las variables incluidas en el modelo (componentes biofísicos) sobre los procesos que generan servicios ambientales. Al conocer este efecto es posible evaluar la importancia de las medidas de conservación consideradas en las políticas del PSAH a las cuales se comprometen los dueños de los predios beneficiados. También se puede jerarquizar el tipo de información que es importante recabar o generar en caso de querer realizar proyecciones más confiables con el modelo. Por otro lado, con una calibración y validación adecuada de estos modelos

incluso se pueden generar proyecciones del estado futuro de estos servicios ambientales.

MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual se presenta en la figura 2 (página 56) y parte del supuesto que el agua en un territorio dado fluye siguiendo el siguiente recorrido:



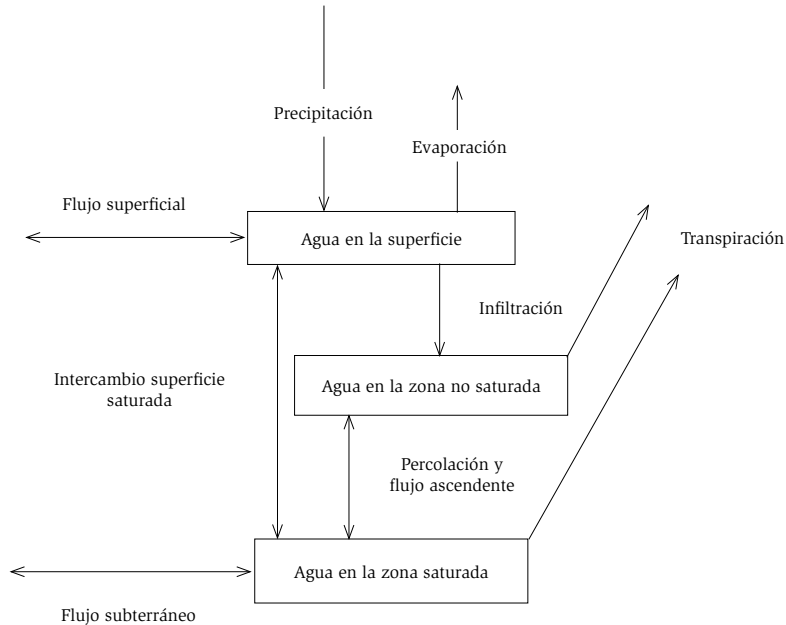
Cada una de las etapas del modelo conceptual presentado está definido por ecuaciones que interrelacionan las características físicas y biológicas que la componen (véase el documento completo en: http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/ev_agua_serv_amb.html).

Sin embargo, el reto de este estudio es proporcionar a los usuarios una fuente de datos accesibles a nivel nacional para la evaluación de los servicios ambientales referidos. Por ello, con base en el modelo conceptual y las ecuaciones anteriores se construyó el modelo de simulación utilizando el programa Stella Research, versión 8.0 para Windows (Stella Research High Performances Systems, 2003).⁸

El diagrama de flujo (figura 3) resume el proceso de toma de datos necesarios para la estimación de los parámetros del modelo de simulación, además se mencionan los componentes y las variables necesarias.

Los parámetros del modelo se obtuvieron a partir de fuentes de información con los siguientes formatos: cartografía digital, cartografía impresa, información bibliográfica y bases de datos de agencias gubernamentales y otras instituciones. Las fuentes de información principales fueron la cartografía impresa y la digital elaborada por el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI, www.inegi.gob.mx), los modelos digitales de elevación y los datos vectoriales

FIGURA 2. MODELO CONCEPTUAL DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS



topográficos se adquirieron en formato digital a escala 1:50,000. También se consultó la cartografía generada por el Instituto Nacional de Ecología (www.ine.gob.mx), por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (www.conabio.gob.mx) e información generada por la Comisión Nacional de Agua (CNA).

CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE

Las características del relieve y geográficas que se pueden obtener a partir del Modelo digital de elevación

escala 1:50,000 del INEGI, se pueden observar en el cuadro 4 y son relativamente fáciles de conseguir.

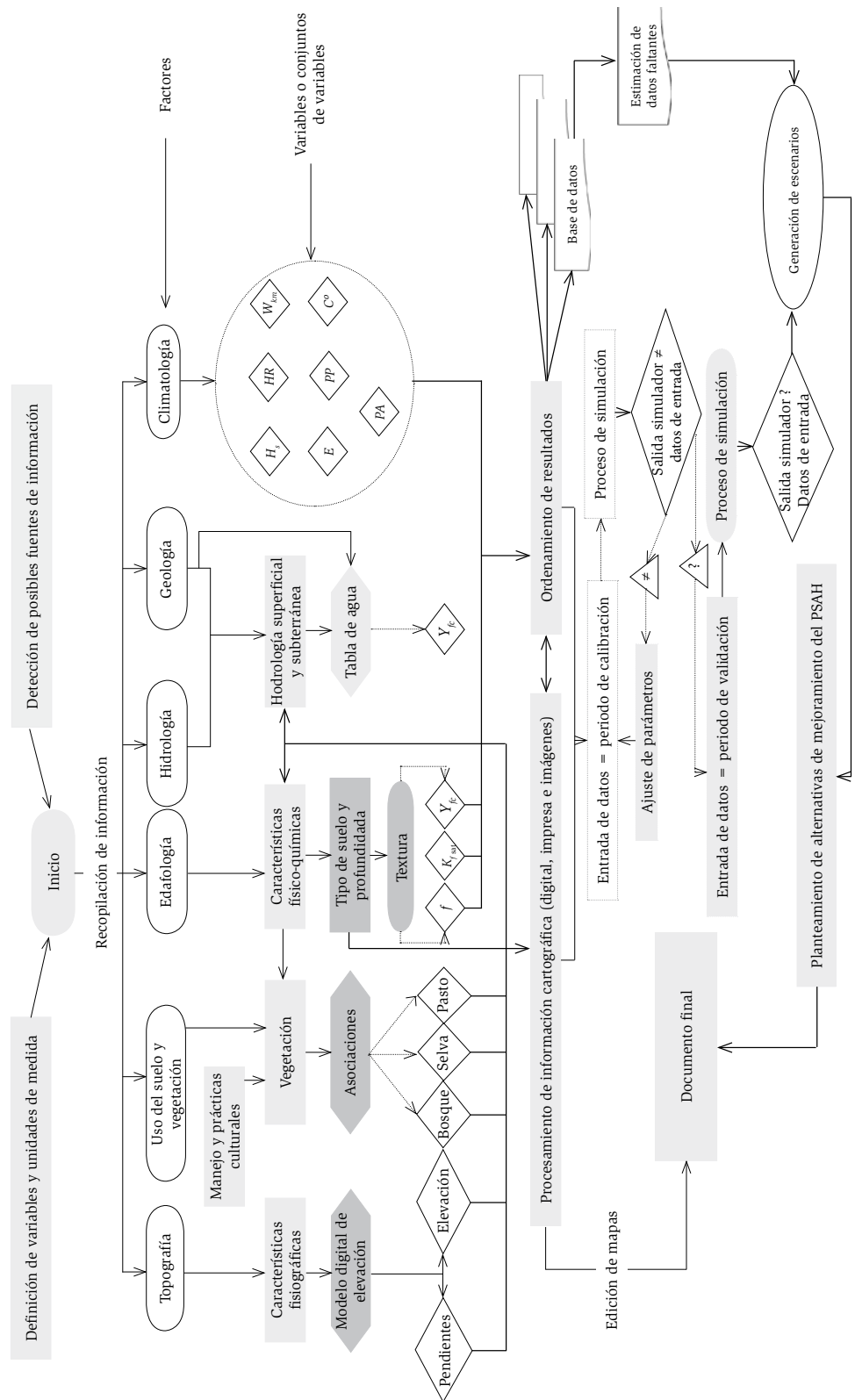
La latitud del sitio, dada en coordenadas geográficas del centroide del sitio, se utiliza para calcular la radiación solar en la atmósfera, la cual se explicará en el tema de clima.

Las pendientes se expresan en mapas al igual que la elevación, con valor de 1 donde no hay inclinación y 9 donde se existe la máxima inclinación; para esta valoración fue necesario generar valores equivalentes entre 1 y 9 que representara los grados

CUADRO 4. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y TOPOGRÁFICAS

FACTORES	VARIABLES	UNIDAD DE MEDIDA REQUERIDA EN EL MODELO
Características del relieve y geográficas	Elevación (altitud)	M.s.n.m.
	Pendiente (inclinación)	Grados de inclinación
	Latitud del sitio	Grados

FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE TOMA DE DATOS Y ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LOS PROCESOS DE FILTRADO, RETENCIÓN Y ALMACENAJE



de inclinación de los sitios a simular (cuadro 5). De acuerdo con el modelo se supone que mientras mayor sea la pendiente menor será la tasa de infiltración. La inclinación de las laderas por donde escurre el agua excedente se expresa en porcentaje de inclinación o en grados de inclinación. Los valores de entrada van entre 0 y 90 grados.

VEGETACIÓN

La vegetación es un factor importante en los procesos de captación de agua, los cuales se ven afectados prin-

cipalmente por la altura de la vegetación, la densidad del follaje y la profundidad de las raíces (cuadro 6).

El índice de área foliar (*IAF*) es el área que cubren las hojas sobre una unidad de área de la superficie. Los valores de *IAF* son importantes en los procesos de intercepción y evaporación. En general, para el caso de México no existen fuentes de información de donde se puedan obtener series de tiempo para este parámetro y que sean de acceso al público. Sin embargo, se pueden utilizar métodos de medición muy sencillos como son los medidores de área foliar o los densiómetros. Otras formas de medición del

CUADRO 5. INTERVALOS DE INCLINACIÓN

PENDIENTE (INTERVALOS)			DESCRIPCIÓN DEL INTERVALO
VALOR DEL MAPA	GRADOS	PORCENTAJE DE INCLINACIÓN (%)	
1	0-5	0-11	De casi plano a ligeramente inclinado
2	6-10	12-22	De ligeramente inclinado a fuertemente inclinado
3	11-15	23-33	De fuertemente inclinado a moderadamente ondulado
4	16-20	34-44	De moderadamente ondulado a escarpado moderado
5	21-25	45-55	De escarpado moderado a escarpado
6	26-30	56-66	De escarpado a muy escarpado en pie de monte
7	30 - 40	66-90	De muy escarpado a laderas poco transitables
8	41-60	91-133	De laderas poco transitables a paredes de caída
9	> 60	133-200	De paredes de caída a escarpados profundos intransitables

CUADRO 6. VARIABLES DEL COMPONENTE VEGETACIÓN

FACTORES	VARIABLES POTENCIALES	UNIDAD DE MEDIDA REQUERIDA
		EN EL MODELO
Vegetación	IAF (índice de área foliar)	S/u
	Profundidad de las raíces	M
	Altura de vegetación	M

IAF, aunque suelen ser mucho más costosas arrojan información precisa cubriendo una mayor superficie, tal es el cálculo del IAF con análisis de imágenes de satélite de alta resolución; de hecho, es la única técnica disponible para la medición de esta variable a nivel regional (Mateucci y Buzai 1998). No obstante, se puede calcular el IAF utilizando los valores del NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Para mayor detalle del proceso se recomienda consultar los trabajos de Running y Hunt (1993) y Mateucci y Buzai (1998).

La profundidad de las raíces, también es una variable de peso en el modelo y depende de las especies que componen un sitio en particular, así como de la profundidad del suelo y de la profundidad y penetrabilidad del manto rocoso. Se recomienda que esta variable se infiera a partir de la experiencia de botánicos, ya que se pueda medir en campo si se tiene la oportunidad de hacerlo, o en su defecto, que se utilicen los valores generalizados por Canadell *et al.* (1996) que se muestran en el cuadro 7.

La altura de la vegetación es una variable relativamente fácil de obtener de forma directa en campo y utilizando el mapa de uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000 generado por INEGI, ya que en el envés del mapa se encuentran los valores de la altura de los estratos que aparecen por asociaciones.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

En cuanto a las características del suelo, el único parámetro que hay que introducir en el modelo es el tipo

de textura. Los valores de porosidad, conductividad hidráulica, cabeza de succión, capacidad de campo y tasa de infiltración están asociados en el modelo a los tipos de texturas. Estas variables influyen en los intercambios de agua entre la zona superficial, la zona no saturada y la zona saturada. Con excepción de las tasas de infiltración, los otros parámetros fueron calculados de acuerdo con Clapp y Hornberger (1978) y Rawls, Brakensiek y Millar (1983) y los resultados aparecen en el cuadro 8.

La capacidad de campo en el presente trabajo, tuvo que ser calculada para cada tipo de textura con

$$U_{fc} = \varnothing \left\{ \left[\frac{\psi_s}{Cp} \right] \frac{1}{b} \right\} (N)$$

la siguiente expresión:

donde

$\varnothing$ es la porosidad por tipo de textura

ψ_s es la cabeza de succión de frente de mojado y

Cp es la cabeza de presión a capacidad de campo en el estado de saturación.

Con relación a las tasas de infiltración, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos ha publicado un *Manual de hidrología e hidráulica* (<ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov>) en donde se describen cuatro grupos de suelo, ordenado según sus características hidrológicas y calculó en laboratorio las tasas de infiltración que se indican en el cuadro 9. Como se observa allí, las mayores tasas de infiltración se dan en los suelos arenosos y las menores en los suelos arcillosos.

CUADRO 7. PROFUNDIDAD DE LAS RAÍCES SEGÚN GRUPO FUNCIONAL DE CRECIMIENTO

Profundidad	Grupo funcional			
	Árboles	Arbustos	Herbáceas y pastos	Cultivos anuales
	7.0 ± 1.2 m	5.1 ± 0.8 m	2.6 ± 0.1 m	2.1 ± 0.2 m

CUADRO 8. PARÁMETROS DE GREEN-AMPT PARA VARIAS TEXTURAS DE SUELO

TEXTURA	CLAVE	POROSIDAD (ϕ)	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA K_{sat} (m/d)	CABEZA DE SUCCIÓN DEL FRENTE HÚMEDO $[\psi_s]$ (m)	FACTOR "B"	CAPACIDAD DE CAMPO $(U_{fc})^2$
Arena	A	0.3950	15.2064	0.1210	4.05	0.0556
Franco arenosa	Ca	0.4100	13.4784	0.0900	4.38	0.0625
Arenosa franca	Ac	0.4350	2.9981	0.2180	4.90	0.0970
Franco limosa	Cl	0.4850	0.6221	0.7860	5.30	0.1543
Franco	C	0.4510	0.6005	0.4780	5.39	0.1334
Franco areno-arcillosa	CAr	0.4200	0.5443	0.2990	7.12	0.1563
Franco limo-arcillosa	CLr	0.4770	0.1469	0.3560	7.75	0.1968
Franco arcillosa	Cr	0.4760	0.2117	0.6300	8.52	0.2275
Arcilla arenosa	Ra	0.4260	0.1875	0.1530	10.40	0.2031
Arcilla limosa	Rl	0.4920	0.0890	0.4900	10.40	0.2623
Arcilla	R	0.4820	0.1106	0.4050	11.40	0.2670

Fuente:(modificado de Clapp y Hornberger 1978, Rawls, Brakensiek y Millar 1983.

CUADRO 9. TASAS DE INFILTRACIÓN USADAS EN EL MODELO SEGÚN LA TEXTURA DEL SUELO

TEXTURA	CLAVE	GRUPO HIDROLÓGICO	TASA DE INFILTRACIÓN (m/d)	
			MÍNIMA	MÁXIMA
Arena	A	A	0.1824	0.2736
Franco arenosa	Ca			
Arenosa franca	Ac			
Franco limosa	Cl	B	0.0912	0.1824
Franco	C			
Franco areno-arcillosa	CAr	C	0.0312	0.0912
Franco limo-arcillosa	CLr	D	0.0000	0.0312
Franco arcillosa	Cr			
Arcilla arenosa	Ra			
Arcilla limosa	Rl			
Arcilla	R			

CUADRO 10. VARIABLES HIDROLÓGICAS

FACTORES	VARIABLES	UNIDAD REQUERIDA EN EL MODELO
Hidrología	Longitud de la red hidráulica en la celda	m
	Altura de la tabla de agua (nivel freático)	m

HIDROLOGÍA

En el modelo es necesario incluir los valores de la profundidad a la que se encuentra el manto freático, expresada en metros y la longitud de la red hidráulica contenida en una celda (cuadro 10).

La altura del manto freático (profundidad a la que se encuentra la cabeza de agua) se puede extraer de la carta de Aguas subterráneas de INEGI, escala 1:250,000; la variable en la carta se denomina Nivel estático (NE). Otra opción es solicitar a la CNA la información de profundidad de los pozos más cercano al sitio a simular. En cuanto a la longitud de la red hidráulica, la variable se mide sólo en la celda de aplicación del simulador y es el resultado de la sumatoria de la longitud de los ríos y arroyos que se encuentran en la celda. Esta variable tiene sentido para el modelo

cuando se pretende aplicar la simulación a más de un sitio. Si el propósito es utilizarlo localmente se puede omitir la longitud de la red hidráulica.

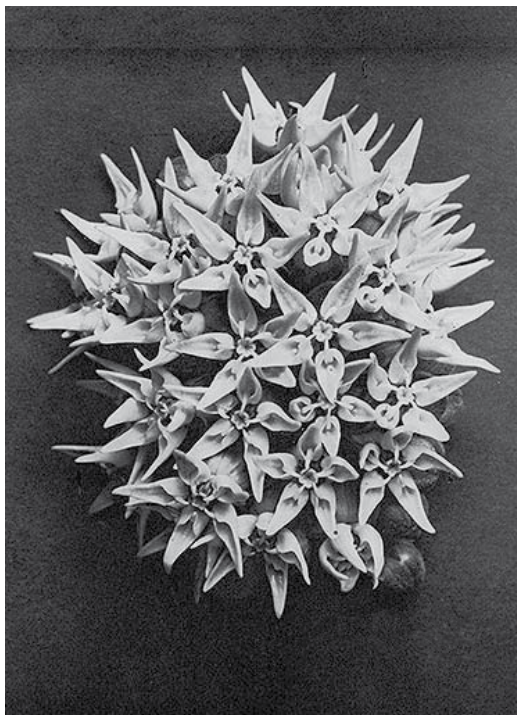
CLIMA

A este factor lo componen las siguientes variables que intervienen en procesos hidrológicos importantes: evaporación, precipitación y evapotranspiración, las cuales son variables que se encuentran en forma de series de tiempo (cuadro 11).

Los datos para estas series de tiempo se pueden obtener de las estaciones meteorológicas que administra la Comisión Nacional del Agua distribuidas en el territorio nacional. La CNA ha concentrado esta información dentro del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II ver. II 2000), y en él

CUADRO 11. VARIABLES DEL FACTOR CLIMA

FACTORES	VARIABLE	ABREVIACIÓN	UNIDAD REQUERIDA EN EL MODELO
Clima	Temperatura promedio del aire	T (°C)	°C
	Precipitación vertical	PP	mm
	Evaporación directa	E	m/d
	Velocidad del viento	Wkm	Km/hr
	Humedad relativa	HR	%



se pueden consultar datos de las medias diarias de temperatura, evaporación de cacerola, precipitación vertical, entre otras. Los datos se pueden solicitar en formato digital en la Gerencia Regional de CNA más cercana o vía internet (www.cna.gob.mx). Otra fuente de información es la generada por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) por medio de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA), las cuales registran automáticamente valores de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

El valor de latitud del sitio se utiliza para el cálculo de la radiación solar con el método de Nikolov y Zeller (1992). Los valores de radiación calculados están dados en series de tiempo diarias. Los datos de radiación solar son necesarios para estimar la evaporación de acuerdo con el método de Christiansen (1968 citado en Haan 1982) y la evapotranspiración por el método de Penman-Monteith. El método de Nikolov y Zeller (1992) sólo ajusta para latitudes del centro de México hacia Norteamérica entre los meridianos de 20° y 64° de latitud ($r^2 = 0.96$). Para el resto de la

República Mexicana se pueden utilizar los valores de radiación solar mensuales que han sido calculados por List (1966) en función de la latitud. Se debe tener en cuenta que la radiación solar para efectos del modelo se necesita en series de tiempo diarias y los valores tomados como constantes, como los generados por List (1966), sólo proporcionan cálculos promedios mensuales. En caso de utilizar estos valores, se debe asumir el error de simulación generado. El modelo puede calcular la evapotranspiración por dos métodos. Uno de ellos es el de Penman-Monteith y el otro es el de de Thornthwaite. Este último método es menos confiable y en la medida de la disponibilidad de datos es mejor usar la ecuación de Penman-Monteith.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Utilizar un modelo basado en procesos para simular las funciones del ecosistema que generan servicios ambientales hidrológicos tiene varias ventajas. Una de ellas es que estos modelos permiten hacer proyecciones para situaciones en las cuales no existe un monitoreo permanente de datos (por ejemplo, mediciones de cantidad o calidad de agua en arroyos). Los modelos basados en procesos utilizan ecuaciones que describen las relaciones entre las variables de entrada y salida, y en el caso de los modelos hidrológicos, casi todos ellos se apoyan en el balance de agua. Para operarlos es necesario contar con datos de variables físicas y biológicas (Neitsch *et al.* 2002), los cuales suelen no estar disponible para muchos sitios. El desarrollo teórico de estos modelos ha hecho posible utilizar métodos que pueden calcular algunas de estas variables con resultados muy aproximados a los datos empíricos. Dada la carencia de información de datos en México para algunas de las variables, la opción de poder calcular analíticamente algunos de los procesos resultó muy conveniente. Por otro lado, la construcción del modelo favoreció el entendimiento de los procesos ecológicos que generan servicios

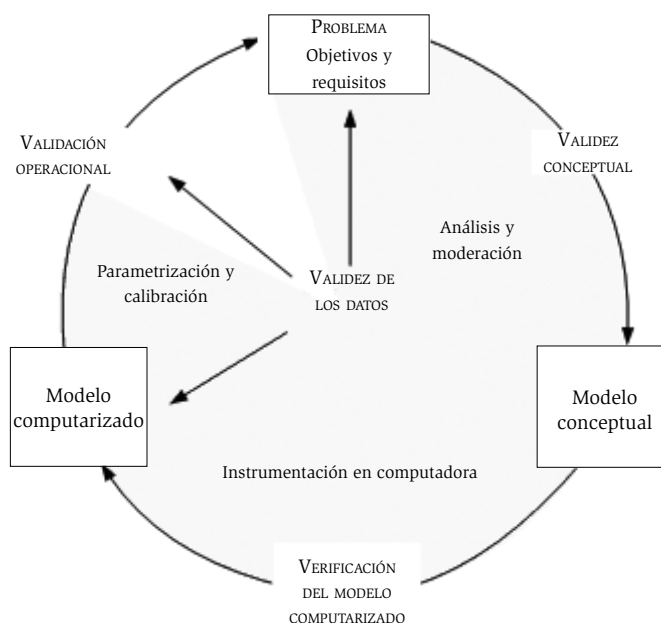
ambientales, por lo que fue posible analizar de qué manera la oferta de estos servicios depende de la combinación de un conjunto de variables biofísicas, las cuales pueden ser medidas o evaluadas para distintos sitios. De hecho, con el modelo sería posible generar una serie de simulaciones orientadas a encontrar aquellas variables que optimizaran uno o varios de los servicios ambientales.

Es conveniente discutir en este momento sobre la posibilidad de utilizar el modelo con fines predictivos. Como se mencionó anteriormente, los modelos basados en procesos permiten proyectar la cantidad de agua considerando las variables que intervienen en el proceso. Para que esto sea posible es necesario que las ecuaciones que gobiernan los procesos y su incorporación en el programa de cómputo sean correctas (verificación del modelo). También se necesita que los valores de los parámetros de estas ecuaciones

correspondan al sitio de interés (parametrización del modelo) y que el modelo sea ajustado con una serie de datos de entradas y salidas (calibración). Una vez realizadas estas pruebas el modelo puede ser “validado” con otra serie de datos independiente. La figura 4 muestra la relación entre estas pruebas y los datos.

La figura 4 indica con un sombreado el estado actual del modelo que se presentó en este trabajo con relación a estas pruebas de validez. En este caso particular, se parte de un modelo conceptualmente validado (balance de agua), que fue verificado (se revisaron a detalle las ecuaciones y su instrumentación en la computadora) y se espera tener próximamente una versión calibrada para el caso de Coatepec, Veracruz. Para ello, actualmente un grupo de investigadores del Instituto de Ecología A.C. (Xalapa) desarrolla un proyecto en la parte alta de la cuenca de la Antigua. Dentro de los objetivos de este proyecto está evaluar

FIGURA 4. CICLO DE MODELACIÓN Y PROCESOS DE VERIFICACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN. LA PORCIÓN SOMBRADA MUESTRA EL ESTADO ACTUAL EN EL QUE SE ENCUENTRA EL MODELO QUE SE UTILIZÓ EN ESTE TRABAJO



Fuente: modificado de Rykiel (1996).

el efecto de distintos tipos de vegetación en los procesos hidrológicos de la zona. Los resultados que se obtengan a través de la instrumentación en varios sitios incrementarán la precisión de los parámetros y podrán ser usados para calibrar y validar el modelo. Una vez que éste haya sido totalmente validado, permitirá hacer mejores predicciones para la zona de Coatepec.

Utilizar los resultados de las simulaciones para predecir los niveles de agua en otros sitios es riesgoso si no se cuenta con una calibración particular para el sitio de interés. Por lo tanto, si el usuario pretende usar el modelo con este fin, deberá ingresar los parámetros particulares del sitio y reajustar alguno de los coeficientes que calibran el modelo.

Otro asunto que es interesante discutir es la aproximación que se siguió para instrumentar el modelo en el programa de cómputo. Como se recordará el modelo fue armado en Stella. Este ejercicio resultó complicado y probablemente implicó más tiempo y esfuerzo del que se hubiera invertido utilizando algunos de los programas de cómputo disponibles (Maidment 1993, Neitsh *et al.* 2002), muchos de los cuales son accesibles y gratuitos. Algunos de ellos, como SWAT (Neitsh *et al.* 2002), están bien documentados y además tienen asociados bases de datos que apoyan el ingreso de los parámetros en el modelo, así como herramientas para acoplarlos con sistemas de información geográfica y rutinas para calibrarlos. Sin embargo, la utilización del modelo nos permitió ahondar en términos de entendimiento y de flexibilidad del modelo. En ese sentido, la estructura modular del programa permite enriquecer la evaluación de los servicios ambientales a medida de que se adquiere el conocimiento y/o los datos que la apoyan.

Finalmente, reconocemos que el PSAH es un gran avance dentro de la política ambiental en México, al retribuir un beneficio a los poseedores de las tierras donde se generan servicios ambientales. Sin embargo, para que este programa sea cada vez más

exitoso, habrá que reconocer que la dinámica propia de los ecosistemas en donde se insertan los PSAH tiene un efecto importante en la oferta ambiental, en la calidad y cantidad de los servicios que provee el ecosistema. Los conceptos e ideas generados en las teorías relacionadas con la dinámica de sistemas y basados en la generación y aplicación de modelos son elementos útiles que pueden apoyar la toma de decisiones relacionadas con el PSAH y el manejo de recursos naturales. Se considera que esta aproximación hace más flexible y sistemático el análisis de los programas de pago de servicios ambientales. Se espera que los resultados del presente trabajo promuevan el análisis de los PSA bajo un esquema multidisciplinario e integral que ayude a entender de qué manera el PSAH influye en la conservación de bosques y selvas y en la provisión de servicios ambientales hidrológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Canadell, J., R. B. Jackson, J. R. Ehleringer, H.A. Mooney, O. E. Sala y E. D. Schulze. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108: 583-585.
- Christiansen, J.E. 1968. Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. *Journal of irrigation and drainage engineering* 94 (IR2): 243-263.
- Dale, V. H. 2003. *Ecological modeling for resource management*. Springer Nueva York, 328 p.p
- De Groot, R.S. 1992. *Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making*. Wolters-Noordhoff, Groningen.
- De Groot R. S., M.A Wilson y R.M.J Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41: 393-408.
- Diario Oficial de la Federación. 2004a. Acuerdo por el que se modifica el diverso que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa de

Servicios Ambientales Hidrológicos. Viernes 18 de junio, Secretaría de Gobernación, México.

———. 2004b. Acuerdo que establece las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del Programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales (PSA-CABSA)

miércoles 24 de noviembre Secretaría de Gobernación, México.

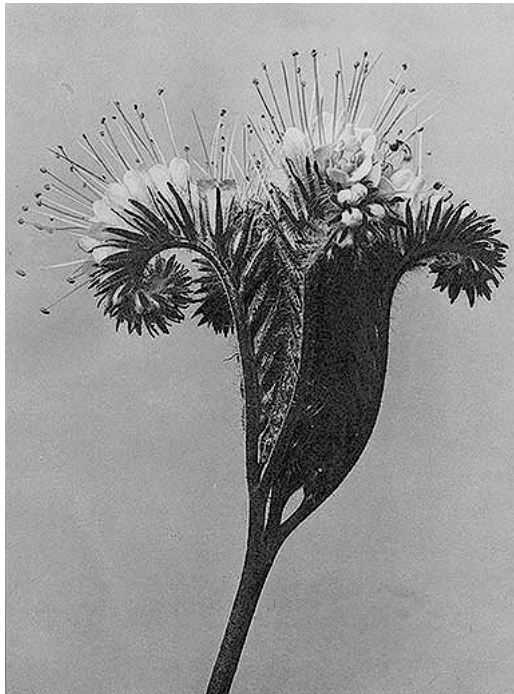
Equihua, M y O Pérez-Maqueo,. 2004. Modelación Matemática y Conservación. Network of Conservation Educators and Practitioners (NCEP). Center for Biodiversity and Conservation. Peer reviewed electronic publication http://cbc.amnh.org/ncep/us/author_info.php.

FAO. 2004. Sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas. Foro Reginal 2-12 de junio de 2003 Arequipa Perú organizado por la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe Santiago, Chile.

Haan, C. T., H. P. Johnson, y D. L. Brakensiek, 1982. Hydrologic modeling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers St. Joseph, Mich.

Haefner, J.W. 1996. *Modeling biological systems: principles and applications*. Chapman & Hall, Nueva York.

Mateucci, S.D. y G.D. Buzai. 1998. *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. EUDEBA,



Buenos Aires, Argentina.

List, R.J. 1966. Smithsonian *Meteorological Tables*. Sexta edición, Smithsonian Institution, Washington, D.C.

Maidment, D.R. 1993. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Nueva York.

May, R. M. 2004. Uses and abuses of mathematics in biology. *Science* 303(5659): 790-793.

Muñoz, C., M. Zorrilla, A.Guevara, J. M. Bulás, J. M. Torres y J. Braña, 2004. El Programa de Pago de Servicios Ambientales en México.

Dirección General de

Investigación en Política y Economía Ambiental (Documento de trabajo). Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 19 pp.

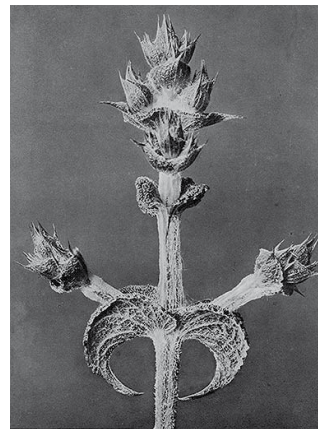
Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams, y K.W. King. 2002. Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Theoretical Documentation, Version 2000. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute Report TR-191.

Nichols, J.D. 2001. Using Models in the Conduct of Science and Management of Natural Resources. En: T. M. Shenk, A. B. Franklin (eds.). *Modeling in natural resource management: development, interpretation, and application*. Island Press, EE.UU.

Nikolov N.T. y K. F. Zeller 1992. A solar radiation algorithm for ecosystem dynamic models. *Ecological Modelling* 61: 149-168.

Orestes, N., K. Shrade-Frechette y K Beliz. 1994. Verification, validation and confirmation on numerical models in the earth sciences. *Science* 263: 641-646.

- Pagiola, S, J Bishop, y N. Landell-Millis, 2003. *La venta de servicios ambientales forestales*. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Pérez-Maqueo, O. Equihua, M. Hernández y G. Benítez. 2001 Visual Programming Languages as a tool to identify and communicate the effects of a development project evaluated by means of an Environmental Impact Assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 21: 291-306.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek y N. Miller, 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(1): 62-70.
- Risbey J., Kandlikar M. and Patwardhan A. 1996. Assessing integrated assessments. *Climatic Change* 34(3/4): 369-395.
- Running, S.W y E. R. Hunt. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for the other biomes, BIOME-EGC, and a application for global scale models. En: *Scaling Physiological Processes: leaf to globe*. Academy Press, Inc. Nueva York.
- Rykiel, E.J. 1996. Testing Ecological models. The meaning of validation. *Ecological Modelling* 90: 229-244.
- Senge, P. M., y J. D. Sterman, 1994. System Thinking and Organizational Learning: Acting Locally and Thinking Globally in the Organization of the Future. En: J.D.W. Morecroft, J. Sterman (eds.). *Modeling for learning organizations*. Productivity Press, Portland, EE.UU.
- Van Den Belt, M. 2004. *Mediated modeling: a system dynamics approach to environmental consensus building*. Island press, EE.UU.
- Voinov, A. Fitz , C. Boumans, M.J. Roelof y R. Costanza, 2004. Modular Ecosystem Modeling. en: Costanza, Robert y Voinov, Alexey, editores. *Landscape simulation modeling: a spatially explicit, dynamic approach*. Springer, New York:. Pp. 43-76.



Este artículo se recibió el 10 de enero de 2006 y fue aprobado en 15 de marzo de 2006.
Imágenes: fotografías de Karl Blossfeldt (1865-1932).