



Análisis de la aptitud territorial

Una perspectiva biofísica

Manuel E. Mendoza, Héctor Plascencia, Camilo Alcántara,
Fernando Rosete y Gerardo Bocco

Planeación Territorial





ANÁLISIS DE LA APTITUD TERRITORIAL





Serie Planeación Territorial

Semblanza histórica del ordenamiento ecológico territorial
en México. Perspectiva institucional
Fernando Rosete

Ordenamiento Territorial Comunitario
Salvador Anta, Arturo Arreola, Marco González
y Jorge Acosta

Naturalezas, saberes y territorios comcáac (seri)
Diana Luque Agraz y Antonio Robles Torres

Ordenamiento ecológico marino: visión temática
de la regionalización
Ana Córdova, Fernando Rosete, Gilberto Enríquez
y Benigno Hernández de la Torre (compiladores)

Manual del proceso de ordenamiento ecológico
Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental,
SEMARNAT

El manejo integral de cuencas en México. Segunda edición
Helena Cotler (compiladora)

Gestión de cuencas y servicios ambientales
Perspectivas comunitarias y ciudadanas
Luisa Paré, Dawn Robinson y Marco Antonio González
(coordinadores)

El ordenamiento territorial: experiencias internacionales
María Evangelina Salinas Escobar (compiladora)





Manuel Mendoza, Héctor Plascencia,
Pedro Camilo Alcántara, Fernando Rosete y
Gerardo Bocco

ANÁLISIS DE LA APTITUD TERRITORIAL UNA PERSPECTIVA BIOFÍSICA

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Instituto Nacional de Ecología
Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental





D.R. © Primera edición: 2010

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
Blvd. Adolfo Ruíz Cortines 4209. Col. Jardines de la Montaña
C.P. 14210. Delegación Tlalpan, México, D.F.
www.semarnat.gob.mx

Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)
Periférico sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco
04530. México, D.F.
www.ine.gob.mx

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental
Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia
Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701. Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta
58190. Morelia, Michoacán, México
www.ciga.unam.mx

DISEÑO DE LA PORTADA: Álvaro Figueroa
MAPA DE LA PORTADA: Arturo Garrido Pérez
EDICIÓN PARA INTERNET: Susana Escobar Maravillas

ISBN: 978-968-817-917-8
Impreso y hecho en México





ÍNDICE

SERIE PLANEACIÓN TERRITORIAL <i>FERNANDO A. ROSETE V.</i>	9
PRESENTACIÓN <i>GERARDO BOCCO</i>	11
AGRADECIMIENTOS	27
INTRODUCCIÓN	29
Principales enfoques en la evaluación de aptitud aplicables a la escala municipal y regional	31
Evaluación de tierras	39
ESTUDIO DE CASO UTILIZANDO EL ENFOQUE DE EVALUACIÓN DE TIERRAS	59
ANÁLISIS DE APTITUD EN LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC, JALISCO-MICHOACÁN	
Introducción	59
Caracterización y evaluación de los paisajes naturales de la cuenca	62
Consideraciones finales	103
ESTUDIO DE CASO UTILIZANDO EL ENFOQUE SAD. ANÁLISIS DE CONFLICTO DE USO DE RECURSOS Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, MICHOACÁN	105
Introducción	105
Área de estudio	106
Materiales y métodos	108
Fase de diseño	109
Resultados	115





Recomendaciones	123
Conclusiones	125
GLOSARIO	127
BIBLIOGRAFÍA	133





SERIE PLANEACIÓN TERRITORIAL

Una parte fundamental del quehacer científico es su difusión. Y en el caso de la ciencia aplicada, que es el tipo de investigación que predomina en el Instituto Nacional de Ecología (INE), documentar las experiencias exitosas es un componente determinante para su divulgación y eventual replicación.

La planeación territorial, tomando en cuenta el entorno ambiental, es reciente en México. Su primer antecedente formal, aunque indirecto, es la Ley General de Asentamientos Humanos (1976), y el primero directo es la Ley Federal de Protección al Ambiente, que en 1982 introduce en la legislación mexicana el concepto de ordenamiento ecológico, por lo que a nivel institucional esta perspectiva apenas supera los 25 años de vida.

Como resultado de esta corta historia, hoy se presenta como una necesidad difundir esquemas metodológicos y procedimientos técnicos, además de casos puntuales exitosos sobre la planeación del uso del territorio a diferentes escalas, para fortalecer las capacidades locales. Esto es lo que motivó al Instituto Nacional de Ecología a editar la serie Planeación Territorial, la cual nació gracias a una iniciativa fruto del inagotable entusiasmo del Dr. Gerardo Bocco.

El principal objetivo de la serie es poner a disposición de un público especializado (o semi especializado) herramientas técnicas y metodológicas para ser utilizadas en los procesos de elaboración técnica de los programas de ordenamiento ecológico del territorio (OET), para que los resultados obtenidos al final del proceso cumplan con un estándar mínimo de calidad y rigor científico, y de





esta manera superar las disparidades que aún hoy persisten entre diferentes procesos de OET. Valga destacar aquí que esta serie no se limita al OET, sino que también presenta ejemplos a ser utilizados en otros procesos de planeación del territorio.

Al definir esta colección se pensó, en primera instancia, en un público conformado por grupos académicos o de consultores encargados de elaborar productos técnicos como programa de OET u otros procesos relacionados. Sin embargo, estas obras puede ser también de utilidad para estudiantes así como para personal de dependencias de gobierno, tanto federales como estatales, cuyas tareas se vinculen con aspectos técnicos, con la implementación y con la evaluación de procesos de ordenamiento territorial dentro de sus respectivas competencias.

Fernando A. Rosete V.





PRESENTACIÓN

Gerardo Bocco

Dentro de la serie Planeación Territorial se llevó a cabo un esfuerzo particular dirigido a la elaboración de un conjunto de cuadernos que profundizan diferentes aspectos relacionados con la regionalización ecológica del territorio (ecoregionalización). Para poner en contexto este material, en esta introducción se hace mención del papel que desempeña la cartografía de los recursos naturales (Bocco *et al.* 2004), y explica el contexto general para los cuadernos dedicados a la cuestión de regionalización ecológica. Estas obras fueron elaboradas en el marco de un proyecto de investigación auspiciado por el Fideicomiso SEMARNAT-CONACYT, en su convocatoria 2002, y ejecutado por académicos de la UNAM (Instituto de Geografía y CIEco, campus Morelia), y personal del propio Instituto Nacional de Ecología.

LA CARTOGRAFÍA DE LOS RECURSOS NATURALES

Tradicionalmente, los recursos naturales se han clasificado como renovables y no renovables, según su tasa teórica de regeneración en el tiempo. Más recientemente, se ha optado por una diferenciación temática (recursos bióticos y abióticos), ligada al aprovechamiento y conservación, y a la oferta de bienes y servicios ambientales. En este contexto, resultan clave las ideas de inventario, localización en el territorio y cambios en el tiempo. La cartografía de los recursos naturales sirve a estos propósitos de manera insustituible; con





el advenimiento de la tecnología digital aplicada al inventario de recursos y a la preparación de mapas, esta tarea se ha desarrollado de forma exponencial.

En México, la producción cartográfica sistemática se inicia con la creación de la actual Dirección General de Geografía (DGG, parte del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, véase www.inegi.gob.mx). La DGG ha producido la cartografía topográfica (planialtimétrica) completa del país a escala 1:50,000, y ha elaborado la cartografía temática a nivel país, a escala 1:250,000, de la mayor parte de los temas relevantes vinculados con los recursos naturales. Si bien la escala de representación de la cartografía temática es sólo apta para el nivel regional y no local (véase el caso de los requerimientos de datos a nivel comunitario en Negrete y Bocco 2003), la oferta de INEGI constituye una base extraordinaria de conocimiento de los recursos naturales y su geografía.

La cartografía de los recursos naturales está estrechamente ligada al desarrollo de las tecnologías de prospección e inventario mediante percepción remota (véase el caso a nivel comunitario en Rosete y Bocco 2003) y con las tecnologías de posicionamiento global satelital. Ambas permiten a los especialistas detectar, localizar y representar de manera eficiente y con alto grado de exactitud, los recursos naturales en sentido amplio. La interpretación de los datos con propósitos clasificatorios también ha evolucionado con la tecnología de obtención y su almacenamiento. Anteriormente, sólo existían mapas impresos, de tal manera que el medio de representación y almacenamiento era uno solo. Actualmente, los mapas existen en formato digital, lo que ha permitido guardar y representar los datos en forma separada; lo que posibilita relacionar de forma coherente y sistemática los datos de localización de los recursos con sus características descriptivas cuantitativas y cualitativas. Este hecho ofrece una visión integral del dato (en su localización geográfica y en sus características temáticas), lo cual mejora las técnicas analíticas, incluyendo las estadísticas y las geo-estadísticas. Las bases de datos así generadas son evaluables en su calidad, tanto de localización como temática. En la actualidad, es tan importante la interpretación y la creación del dato como su validación, de ser posible, en forma cuantitativa.





LA REGIONALIZACIÓN ECOLÓGICA

Durante las últimas décadas, la presión de las actividades antrópicas ejercida sobre los ecosistemas naturales y los territorios dedicados a actividades productivas ha ido en aumento, provocando intensos efectos ambientales negativos que disminuyen la calidad de vida de los habitantes actuales y comprometen seriamente el bienestar de las generaciones futuras (véase, entre otros, los informes emanados del Millenium Ecosystem Assessment, elaborados entre 2002 y 2005 en www.milleniumassessment.org).

En México, diversos problemas sugieren que actualmente se realiza un uso inapropiado del territorio, lo cual impide el aprovechamiento de los bienes y servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas. Una extensa superficie del país presenta severos problemas de erosión hídrica y degradación de suelos en general (SEMARNAT-Colegio de Postgraduados 2002); grandes áreas están expuestas a los efectos de riesgos naturales (Oropeza *et al.* 1998); las zonas urbanas y la infraestructura crecen sin la planificación adecuada (Cardona 1993); la diversidad biológica se reduce con los cambios no deseados de la cobertura vegetal, lo cual es particularmente grave en un país megadiverso, debido a la reducción y destrucción de los hábitats (Velázquez *et al.* 2001). Estos problemas sugieren que el territorio debería estar sujeto a procesos de planificación territorial los cuales, en cualquier modalidad y a cualquier escala, requieren como fundamento su regionalización ecológica.

De manera simple, la regionalización ecológica o eco-regionalización consiste en delimitar espacios geográficos relativamente homogéneos en función del medio físico y biológico, de tal manera que se pueda establecer una adecuada vinculación con el uso y apropiación del territorio por parte de la sociedad. La clasificación ecológica del territorio es el proceso de delinear y clasificar áreas ecológicamente distintivas de la superficie de la Tierra. Cada porción del territorio puede ser vista como un sistema, resultado de la interacción de factores geológicos, climáticos, geomorfológicos, edafológicos, hídricos, de vegetación y fauna silvestre, y su manejo por comunidades humanas. En este sentido, las





regiones ecológicas o ecoregiones también encierran aspectos sociales, económicos y culturales. Sin embargo, esta interacción no se da al azar, sino en forma ordenada, siguiendo la organización jerárquica que guardan los componentes naturales (litosfera, atmósfera, biosfera), mismos que en conjunto generan lo que conocemos como ambiente o espacio. El enfoque holístico en la clasificación de los territorios se puede aplicar a escalas crecientes, en forma anidada, desde los ecosistemas locales específicos hasta los continentales.

La regionalización ecológica es un proceso por el cual, a partir del uso de determinados sistemas clasificatorios, se delinean unidades relativamente homogéneas según uno o varios criterios (variables), y se representan en forma de mapas (y bases de datos geográficos) utilizando leyendas (modelos cartográficos) jerárquicas (anidadas). En otras palabras, se trata de la determinación (delineación, de manera cualitativa o cuantitativa) de diferentes niveles de homogeneidad sobre el territorio. Desde el punto de vista geométrico (es decir, en términos de las entidades con que se opera) se trata de unidades de área (con largo y ancho), diferentes de los puntos, resultado de las observaciones casuísticas típicas del levantamiento biológico en el campo.

En términos operacionales, el proceso de regionalización ecológica adopta dos grandes líneas de acción. Una, que podríamos denominar paramétrica, se basa en el uso de capas de información almacenadas en un SIG, a las cuales se somete a procedimientos automatizados de agrupamiento de homogeneidades en un ambiente multivariado (utilizando generalmente análisis de componentes y de cúmulos). Este enfoque ha sido aplicado a territorios del orden de algunas decenas de miles de kilómetros cuadrados. Su uso a niveles mayores (por ejemplo, México), y en un medio de gran complejidad, como es el caso de los países tropicales con diversos pisos altitudinales, no ha sido aún explorado para fines prácticos. La segunda línea de acción también se basa en el uso de información pre-existente, al menos a los niveles más generales, pero partiendo de una armonización de los sistemas categóricos de las variables que se seleccionen para describir las unidades ecoregionales.

La regionalización ecológica del territorio es necesaria para diseñar la evaluación del estado del ambiente y para la planificación del aprovechamiento de





los recursos naturales a varias escalas, es decir, es un insumo clave en el manejo y gestión del territorio. A pesar de su trascendencia, tanto el concepto como su operación aún son susceptibles de análisis y discusión. De hecho, en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la regionalización ecológica del territorio se concibe erróneamente como un “objeto” del ordenamiento ecológico, y no como uno de sus prerrequisitos. Esta situación se origina por tres motivos. En primer lugar, algunos modelos de regionalización no favorecen la evaluación de la aptitud productiva del terreno, paso crucial en el ordenamiento. En segundo lugar, hay poca coherencia en los criterios rectores para los diferentes niveles cartográficos, y en la ausencia de criterios para conectarse a los niveles subsiguientes. Finalmente, aunque la mayoría de los expertos reconocen que el relieve debe ser la base de cualquier clasificación integral de unidades ambientales, la utilización de conceptos y terminología geomorfológico-genética dificulta su aplicación en los estudios de ordenamiento por parte quienes no son especialistas en ese tema.

Un aspecto básico de la regionalización es la de proporcionar información sobre la vocación específica de cada región, ya que la toma de decisiones en materia ambiental se realiza a partir del conocimiento de la naturaleza y aptitud de territorios que albergan recursos naturales concretos. En ese sentido, la cartografía geomorfológica por sí sola ofrece una visión parcial del estado del territorio y de su aptitud (Verstappen y Van Zuidam 1991). Esta situación plantea a científicos y planificadores la necesidad de utilizar enfoques más integradores, sin perder la base geomorfológica.

En este trabajo se propone una regionalización del territorio basada en unidades de paisaje (Zonneveld 1995), donde el punto de partida es la delimitación geomorfológica. La unidad de paisaje es la mínima unidad cartografiable que permite representar espacialmente los principales componentes de un ecosistema (estructural y espacialmente). El enfoque que permite su definición, estudio, análisis y predicción es la geoecología o ecología de paisaje (Naveh y Lieberman 1993). Además, un mapa de unidades de paisaje es compatible con otros modelos de segmentación del territorio; por ejemplo, unidades de paisaje localizadas al interior de cuencas o municipios.





Estas premisas reconocen que el paisaje así considerado está conformado por dos grandes componentes. Uno físico, que describe la secuencia sobre el territorio del conjunto roca-relieve-suelo, cuya tasa de cambio en el tiempo es baja o muy baja. Por el contrario, el otro, que describe el dominio bioclimático y de uso del suelo, se caracteriza por un gran dinamismo a varias escalas temporales. Ambos componentes pueden manipularse por separado en bases de datos geográficas automatizadas (en el marco de un sistema de información geográfica), y combinarse sistemáticamente sin perder su individualidad cuando sea necesario. Por ejemplo, el mapa de uso del suelo es fundamental, ya que permite la vinculación entre los aspectos claramente físicos y bióticos, con aquéllos que describen los efectos de la actividad antrópica. Asimismo, de la comparación de los usos del suelo actuales con los potenciales, es posible definir un primer nivel de conflicto en el ámbito del sistema natural.

La utilización del enfoque de paisaje en la regionalización ecológica enriquece el conocimiento sobre la distribución geográfica de los recursos naturales (y de los ecosistemas que los albergan), su dinámica en el tiempo, y la tolerancia del ambiente a la intervención humana. También permite evaluar la aptitud productiva del territorio, la distribución geográfica de la biodiversidad, los riesgos ambientales y los conflictos potenciales entre aptitud y uso actual del suelo. En ese sentido, la regionalización en unidades de paisaje constituye el sustento físico natural del ordenamiento territorial y dentro de éste de las unidades de gestión ambiental.

En los cuadernos ofrecidos en esta subserie, los criterios para la ecoregionalización del país han sido establecidos para trabajar a un nivel de detalle regional (escala 1:250,000) por dos motivos principales. En primer lugar, esta escala nos permite presentar con un detalle suficiente a las unidades territoriales resultantes así como un primer nivel de aproximación a la evaluación de su aptitud, como base del ordenamiento regional. En segundo lugar, las principales bases de datos del relieve y suelos a nivel nacional están representadas a 1:250,000. Sin embargo, tanto para la regionalización propiamente dicha como para los productos derivados de las diversas evaluaciones ya señaladas, se requiere un método que permita la vinculación (en forma anidada) con escalas más detalladas (1:100,000-1:50,000), para relacionar los proyectos de planificación re-





gionales con los locales. El sistema y las bases de datos que lo describen estarán enmarcado en la leyenda propuesta por la Comisión de Cooperación Ambiental en su proyecto de Regiones Ecológicas de América del Norte (CCA 1997), en particular la revisión desarrollada por INEGI, CONABIO e INE en 2005.

ANTECEDENTES DE LOS CUADERNOS SOBRE ECOREGIONALIZACIÓN

Dada la importancia de contar con un esquema de regionalización jerárquica y anidada a escalas nacional, regional y local, y debido a que dentro de la normatividad gubernamental vigente es atribución del Instituto Nacional de Ecología (INE) abordar este tema (véase el Reglamento interno de la SEMARNAT y órganos desconcentrados en www.semarnat.gob.mx), dicha institución se hizo cargo de desarrollar un procedimiento de ecoregionalización, el cual fue establecido con base en un criterio geomorfológico (INE 1998). Los objetivos del trabajo abordado por el INE fueron:

- 1 Formular un marco conceptual y metodológico para la regionalización ecológica en México, a escala 1:250,000, a partir del uso de unidades de paisaje basadas en la regionalización geomorfológica del territorio, con el propósito de ofrecer un marco geográfico para la evaluación de:
 - la aptitud productiva del terreno.
 - el manejo de cuencas, incluyendo una sección sobre ambientes riparios.
 - la distribución de la biodiversidad y los servicios y bienes ambientales que proporciona, y
 - la zonificación de riesgos naturales, ejemplificada con el tema inestabilidad de laderas.
- 2 Formular un método de eco-regionalización y de evaluación anidado a escalas más detalladas (1:100,000-1:50,000) y ponerlo a prueba en estudios de caso específicos.
- 3 Presentar los resultados en formato de manuales dirigidos a usuarios interesados en la realización de ordenamientos ecológicos, evaluaciones de





impacto, planes de manejo y otros instrumentos de la política pública ambiental.

La definición de un procedimiento de ecoregionalización adecuado para satisfacer las múltiples necesidades de evaluación señaladas en el punto 1 requirió:

- Establecer un sistema de clasificación del (macro) relieve y geoformas subordinadas, con una clara connotación jerárquica, donde las unidades contempladas en cada nivel puedan ser definidas con precisión.
- Especificar la utilización de unidades territoriales con un enfoque taxonómico y multiescalar que permita moverse de lo general a lo particular, y viceversa, las cuales sean aptas para representar varios niveles (nacional, estatal, municipal) y por lo tanto diversas escalas.
- Establecer un sistema de clasificación donde se expliquen claramente los criterios rectores y donde se definan las pautas para conectarse a los niveles subsiguientes.
- Definir la utilización de unidades espaciales donde puedan integrarse los principales componentes del terreno en un enfoque sistémico o paisajístico.
- Hacer uso de un lenguaje claro y conciso que pueda ser entendido por especialistas diferentes al área de las ciencias de la tierra (planificadores, científicos sociales, usuarios en general).

El propósito de esta subserie de cuadernos es constituir una metodología de ecoregionalización que sea replicable, y que pueda ser desarrollada por profesionistas en temas afines que no cuenten con un alto nivel de especialización en todos y cada uno de los temas involucrados.

ESTRUCTURA Y CONTENIDOS

Dada la complejidad del proceso de regionalización así como de los productos que de él se derivan (aptitud productiva, distribución de la biodiversidad, riesgos naturales), los resultados del trabajo realizado se presentan en tres cua-





ernos. En ellos se incluyen estudios de caso a escala regional (1:250,000) y ejemplos con todo el ejercicio de ecoregionalización realizado a escala semi detallada (1:50,000).

El primero de los cuadernos ofrece una revisión cuidadosa de los diversos esquemas de regionalización en geomorfología que son utilizados por las diversas escuelas en cartografía a nivel internacional y nacional.

El segundo trabajo trata sobre la regionalización geomorfológica y su vinculación con el levantamiento y cartografía de suelos, para proponer un esquema integrado geopedológico, lo cual constituye el primer paso de la regionalización ecológica. Allí se describen los sistemas clasificatorios para geoformas, y la integración, a varias escalas, de la información edáfica obtenida en campo. Se contemplan dos situaciones: una para el caso donde existan datos de levantamiento de suelos, y otra cuando se requiera realizar el levantamiento en campo. Se propone, asimismo, la forma de integrar los datos provenientes de INEGI a sus dos escalas de representación (1:250,000 y 1:50,000).

En la tercera obra se analizan estrategias de evaluación de aptitud productiva del territorio y se revisan los métodos más utilizados en México y otros países análogos en cuanto a características ambientales y problemáticas. Se cotejan los requerimientos de sistemas productivos seleccionados contra las características o cualidades de los territorios en estudio, estos últimos segmentados en unidades geopedológicas, tal como fueron descritas en el cuaderno anterior. Se presentan dos enfoques distintos utilizados para implementar modelos de evaluación de tierras: el cualitativo y el cuantitativo. Ambas aproximaciones permiten optimizar las proposiciones de uso de las tierras, ya sea a nivel de aptitud o vocación. Tradicionalmente, se han utilizado procedimientos cualitativos para generalizar las aptitudes de uso y para seleccionar los usos recomendados. Esta metodología es apropiada en estudios a pequeña escala, donde hay una mayor generalización en el nivel de detalle de los datos, como los estudios regionales. El enfoque cuantitativo se utiliza en presencia de una base de datos con mayor detalle y precisión, como en los estudios a gran escala. En síntesis, la escala del estudio, con el consiguiente nivel de detalle de los datos condiciona el enfoque utilizado para la evaluación de tierras.





Los tres cuadernos iniciales de esta serie están dedicados al procedimiento de ecoregionalización con énfasis en los aspectos biofísicos en planificación; sin embargo, no queda agotado el tema, por lo que es posible que en el futuro aparezcan más títulos relacionados con estos aspectos. A mediano plazo será necesario emprender una segunda etapa, tal vez más relevante y compleja que ésta, donde se ofrezcan enfoques, métodos y técnicas para los aspectos sociales, económicos y culturales que son trascendentales para la planificación territorial y el manejo de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- Bocco, G., M. Orozco, E. Peters y E. Ezcurra. 2004. La cartografía de los recursos naturales. En: *Patrimonio cultural y turismo*. Cuadernos 8. Cartografía de Recursos Culturales de México. Pp. 137-152. CONACULTA, México.
- Cardona, O. D. 1993. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo-elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo. En: Andrew Maskrey (comp.). *Los desastres no son naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Pp. 45-65.
- Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). 1997. *Regiones ecológicas de América del Norte. Hacia una perspectiva común*. Comisión para la Cooperación Ambiental, 71 pp.
- Hernández-Madrigal, V. M. 2005. Caracterización de los procesos de remoción en masa en la Región de Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, México. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de posgrado para obtener el grado de Doctor en Geografía, México, 120 pp.
- Instituto Nacional de Ecología. 1998. Programa de actualización del ordenamiento ecológico general del territorio del país. Segunda fase: Diferenciación tipológica de las regiones ecológicas de México, en la modalidad de nivel 5, escala 1/250,000. Dirección General de Normatividad Ambiental, Departamento de Ordenamiento Ecológico, México.
- Naveh, Z. y A. S. Lieberman. 1993. *Landscape ecology, theory and application*. Springer Verlag, EUA. 360 pp.





- Negrete, G. y G. Bocco. 2003. El ordenamiento ecológico comunitario. *Gaceta ecológica* 68: 9-22. Disponible en: www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaPublicacion.php. Consultada en enero de 2006.
- Oropeza, O., O. Zamorano y M. Ortiz. 1998. Peligros geomorfológicos en México: remoción en masa. En: M. Garza y D. Rodríguez (coord.). *Los desastres en México, una perspectiva multidisciplinaria*. Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, UNAM, MÉXICO. Pp. 149-184.
- Pack, R. T., D. G. Tarboton y C. N. Goodwin. 2001. Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP, in 15th annual GIS conference, GIS 2001, Vancouver, British Columbia, 19-22 de febrero.
- Rosete, F. y G. Bocco. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta ecológica* 68: 43-54. Disponible en: www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaPublicacion.php. Consultada en enero de 2006.
- SEMARNAT-Colegio de Postgraduados. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana. Escala 1:250 000. Memoria Nacional, 2001-2002. México. 2003.
- Velázquez, A., G. Bocco y A. Torres. 2001. Turning scientific approaches into practical conservation actions: the case of Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, México. *Environmental Management* 5:216-231.
- Verstappen H. Th. y R. A. Van Zuidam. 1991. *El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. Una base para la evaluación de recursos y riesgos naturales*, ITC, public. No. 10, Enschede, Holanda, 89 pp.
- Zonneveld, I. S. 1995. *Land ecology*. SPB Academic Publishing, Amsterdam.

OTRA BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE SOBRE EL TEMA

- Barajas de Labastida, V., H. Carrillo Rozado, O. Chávez Rivera, J. M. Espinoza Rodríguez, K. Kushida, R. Lacy Tamayo, A. Lara Vásquez, N. Méndez Mungaray y E. Miranda Viquez. 1986. *Regionalización ecológica del territorio*. Serie Cuadernos Básicos n°4, Ordenamiento Ambiental, SEDUE, México, 21 pp.





- Barrera-Bassols, N. 1987. El balance morfogénesis-pedogénesis de una cuenca lacustre del eje neovolcánico transmexicano: la región natural del Pátzcuaro, Michoacán. En: D. Geissert y J. P. Rossignol (eds.). *La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales*. INIREB-ORSTOM, México, 83 pp.
- Bocco, G. y J. L. Palacio. 1982. Utilidad de la cartografía geomorfológica en la evaluación y planeación del territorio. *Anuario de Geografía XXII*: 29-40, UNAM, México.
- y M. Mendoza. 1999. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. En: P. Corona-Chávez e I. Israde-Alcántara (eds.). *Carta Geológica de Michoacán, escala 1:250,000*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Pp.74-90.
- , M. Mendoza y A. Velázquez. 2001a. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping- a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39:211-219.
- , M. Mendoza y O. Masera. 2001b. La dinámica del cambio de usos del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas* 44:18-38.
- Bolós I., M. Capdelia, M. Bovet Pla, X. Estruch García, R. Pena, I. Villa, J. Ribas Vilás y Soler Insa. 1992. *Manual de ciencia del paisaje. Teoría, métodos y aplicaciones*. Masson, Barcelona. 273 pp.
- Brady N. C. y R. R. Weil. 1999. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, EUA. 345 pp.
- Breimer R. F., A. J. van Kekem y H. Van Reuler. 1986. *Guidelines for soil survey and land evaluation in ecological research*. MAB Technical notes 17, UNESCO. 125 pp.
- Campos, A. C. 1987. Los medios penestables: procesos morfodinámicos en una unidad morfoedafológica, Municipio de Cosautlán, Ver. En: D. Geissert y J. P. Rossignol (eds.). *La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales*, INIREB-ORSTOM, México, 83 pp.
- CONABIO. 2000. *Estrategia Nacional sobre biodiversidad de México*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 103 pp.





- Cotler H., E. Durán y C. Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque tropical caducifolio. En: F. Noguera, J. Vega, A. García y M. Quesada (eds.). *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología, UNAM, México, pp. 17-79.
- Dudal, R. 1986. The role of pedology in meeting the increasing demands on soils. *Proc 13th Int. Cong. of Soil Sci., Hamburg VI*: pp. 80-96.
- Estrada, J. W. y C. A. Ortiz Solorio. 1982. Plano de erosión hídrica del suelo en México. *Revista Geografía Agrícola* 3: 23-27.
- FAO. 1976. *A framework for land evaluation*. Soils bulletin 32, Roma.
- . 1985. *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. Soils bulletin 52, Roma.
- . 1997. *Zonificación agro-ecológica. Guía general*. Boletín de Suelos 73, Roma.
- García Lagos, R. 1983. Diagnóstico sobre el estado actual de la erosión en México. *Terra* 1(1):11-14.
- García, N. H., J. López-Blanco, R. Moreno S., M. L. Villers-Ruiz y R. García. 1998. Potencial agrícola del distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato, México. Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) utilizando un SIG. *Investigaciones Geográficas* 38: 69-83.
- Geissert, D. y J. P. Rossignol. 1987. *La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales*. INIREB-ORSTOM, México, 83 pp.
- Geissert, D., D. Dubroeuq, A. Campos y E. Meza. 1994. Carta de unidades geomorfo-edafológicas de la región natural Cofre de Perote, Veracruz, México, escala 1:75,000. Instituto de Ecología-ORSTOM-CONACYT, Instituto de Ecología A.C., Xalapa, México.
- Geissert, D. y D. Dubroeuq. 1995. Influencia de la geomorfología en la evolución de suelos de dunas costeras en Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, 3: 37-52.
- Geissert, D. 1999. Regionalización geomorfológica del estado de Veracruz. *Investigaciones Geográficas* 40: 23-47.
- . 2000. La cartografía morfoedafológica: un método integral para la evaluación del recurso suelo. En: J. F. López-Olguín, A. Aragón G. y M. A. Valera (eds.).





- Métodos de investigación en las ciencias ambientales*. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México, pp. 1-14.
- González, A., A. Turrent y R. Aveldaño S. 1990. *Provincias agronómicas de las tierras de labor bajo temporal en México*. SARH-INIFAP, México.
- Gutiérrez, R. 1987. Morfoedafología del Totonacapan con énfasis en los aspectos geomorfológicos. En: D. Geissert y J. P. Rossignol (eds.). *La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales*. INIREB-ORSTOM, México, 83 pp.
- Hennings, V. 2002. Accuracy of coarse-scale land quality maps as a function of the upscaling procedure used for soil data. *Geoderma* 107: 177-196.
- INE. 2001. El ordenamiento ecológico en la gestión y manejo de recursos naturales de cara al siglo XXI. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México.
- Kilian, J. 1972. Les inventaires morphopédologiques. Applications au développement agricole. *L'Agronomie Tropicale* XXVII (9): 930-938.
- Logofet, D. O. y E. V. Lesnaya. 2000. The mathematics of Markov models. What Markov chains can really predict in forest succession. *Ecological Modelling* 285-298.
- López-Blanco, J. y L. Villers-Ruiz. 1995. Delineating boundaries of environmental units for land management using a geomorphological approach and GIS: A study in Baja California, México. *Remote Sensing of Environment* 53: 109-117.
- Ludwig, J. A., J. F. Reynolds. 1988. *Statistical ecology*. John Wiley and Sons, New York, EUA. 337 pp.
- Lugo, H. J. y C. Córdova F. 1992. Regionalización geomorfológica de la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas* 25:25-63, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Maass, J. M. 1995. Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. En: S. H. Bullock, H. A. Mooney y E. Medina (eds.). *Seasonally dry tropical forest*. Cambridge University Press. Pp. 399-422.
- Malczewsky, J. 1999. Spatial multicriteria decision analysis. En: J. C. Thill (ed.). *Spatial multicriteria decision making. A geographic information sciences approach*. Ashgate, Gran Bretaña. Pp. 11-48.
- Mendoza, E. M. y G. Bocco. 1998. *La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica*. Serie Varia no. 17, Instituto de Geografía, UNAM. Pp. 25-55.





- Mittermeier, R y C. Goettsch Mittermeier. 1997. *Megadiversidad. Los países biológicamente más ricos del mundo*. CEMEX, México.
- Ortiz, P. M. A. y L. Espinosa R. 1991. Clasificación geomorfológica de las costas de México. *Geografía y Desarrollo* 11(6):2-9.
- Ortiz-Solorio, A. C. y E. H. Cuanalo de la Cerda. 1978. *Metodología del levantamiento fisiográfico. Un sistema de clasificación de tierras*. Colegio de Postgraduados de Chapingo, México. 85 pp.
- Palacio-Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González, G. Gómez-Rodríguez, J. López-García, M. Palma Muñoz, I. Trejo-Vázquez, A. Peralta Higuera, J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo y F. González Medrano. 2000. El estado actual de los recursos naturales de México: resultados del inventario forestal nacional 2000. *Investigaciones Geográficas* 43:183-203.
- Quiñónez, G. H. 1987. El sistema fisiográfico de la Dirección General de Geografía. *Revista de Geografía* 1(2):13-20.
- Rosete, V. F. y G. Bocco. 1999. Ordenamiento territorial. Bases conceptuales y estrategias de aplicación en México. *Revista Geografía Agrícola* 28: 21-39. Enero-junio.
- Rosete, V. F. 1998. Diseño de base de datos para su aplicación en la evaluación de tierras de la comunidad indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Tesis de Maestría, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 78 pp.
- Rossiter, D. V. 1990. Ales: a framework for land evaluation using a microcomputer. *Soil Use & Management* 6(1):7-20.
- Rossignol, J. P., D. Geissert, A. Campos y J. Kilian. 1987. Mapa de unidades morfoedafológicas del área Xalapa-Coatepec, escala 1:75,000, INIREB-ORSTOM_CIRAD, Instituto de Ecología A.C. Xalapa, México.
- SEDESOL. 1993. Ordenamiento ecológico general del territorio nacional. Dirección General de Planeación Ecológica, Instituto Nacional de Ecología, México.
- SEMARNAT. 2002. Términos de referencia del Fondo Sectorial de Investigación Ambiental. Área 1: Ordenamiento ecológico y conservación de ecosistemas. SEMARNAT, México. Pp. 11-13.





- Theocharopoulos, S. P., D. A. Davison, J. N. Mc Arthur y F. Tsouloucha. 1995. GIS as an aid to soil surveys and land evaluation in Greece. *Journal of Soil and Water Conservation* 50(2): 118-124.
- Tricart, J. y J. Kilian. 1979. *L'éco-géographie et l'aménagement du milieu naturel*. Francois Maspero, París. 326 pp.
- Turrent, F. 1986. *Estimación del potencial productivo actual del maíz y frijol en la República Mexicana*. Colegio de Posgraduados Chapingo, México.
- Vázquez, V. 1986. La conservación del suelo y agua en México. Manuscrito DGNA-SARH, México, 54 pp.
- Van Diepen, C. A., H. Van Keulen, J. Wolf y J. A. A. Berkhout. 1991. Land evaluation: from intuition to quantification. En: B. A. Stewart (ed.). *Advances in Soil Sciences*, Springer, pp. 139-204.
- Velázquez, A. 1993. *Landscape ecology of Tláloc and Pelado volcanoes, México*. ITC publication No. 16.
- Verstappen, H. Th. 1984. *Applied geomorphology*. Elsevier, Holanda.
- Zinck, J. A. 1996. La información edáfica en la planificación del uso de las tierras y el ordenamiento territorial. En: R. J. Aguilar, R. A. Martínez y R. A. Roca (eds.). *Evaluación y manejo de suelos*. Consejería de Agricultura, Junta de Andalucía, Sociedad Española de Ciencia del Suelo, Universidad de Granada. Pp. 49-75.
- . 1990. *Soil survey: epistemology of a vital discipline*. ITC Journal 1990-4. Pp. 335-351.
- . 1988. *Physiography and Soils*. Soil Survey Course ITC, Enschede. Holanda. 156 pp.
- Zonneveld, I. H. 1979. *Land evaluation and landscape science*. ITC, Holanda.





AGRADECIMIENTOS

Este documento es el resultado de una investigación financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT (Proyecto SEMARNAT 2002-CO1-0133, Ecoregionalización como base para la evaluación de la aptitud del territorio), en el marco del Fideicomiso SEMARNAT-CONACYT, convocatoria 2002-2003. Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento otorgado por el Colegio de Michoacán. Las bases de datos topográficas e hidrográficas fueron proporcionadas por Colegio de Michoacán, las base de datos geológicos y de suelos fueron amablemente transferidas por el INE.







Introducción

La regionalización ecológica permite segmentar el territorio en unidades territoriales relativamente homogéneas, pero no describe la aptitud del terreno para uno o varios usos posibles del mismo. La oferta ambiental de una porción de terreno se puede valorar, por unidades territoriales, al evaluar su capacidad (*land capability*) o aptitud (*land suitability*), para diversos sistemas productivos o tipos de utilización del suelo (*land evaluation*) (véase la revisión sobre conceptos y técnicas en Rossiter 1996 y Malczewski 2004). Se trata del proceso de predecir el uso potencial del terreno sobre la base de sus atributos. La información resultante es indispensable en cualquier modalidad de planificación territorial, ya que la misma permite, por un lado, establecer y armonizar lineamientos sobre el tipo e intensidad de uso, y por otro, evaluar los conflictos que puedan surgir entre la demanda de recursos por parte de la población y la oferta de recursos por parte del ambiente (Zinck 1996).

El concepto de aptitud está estrechamente ligado a características ambientales del área (en particular bioclimáticas e hídricas derivadas) y a las propiedades del suelo en su distribución en formas del terreno (en particular, calidad del suelo; véase también una revisión sobre este tema en Karlen *et al.* (2003). La aptitud considera también limitantes y restricciones físicas para desarrollar alguna actividad productiva en particular. En México, el concepto de aptitud está vinculado con los conceptos de capacidad agrológica, uso potencial o vocacional de un terreno o porción de territorio.





Existen enfoques sectoriales para evaluación de recursos específicos (forestales o hídricos, por ejemplo), mismos que no serán considerados en este trabajo. Otras aproximaciones utilizan el análisis de aptitud en el esquema de la evaluación de sustentabilidad de sistemas agrícolas particulares. En México, por ejemplo, se ha desarrollado el marco MESMIS, diseñado para el trabajo a escala de productor (véase la descripción detallada en www.gira.org.mx), cuyo objetivo principal es brindar un marco metodológico para evaluar la sustentabilidad de diferentes sistemas de manejo de recursos naturales a escala local (parcela, unidad productiva, comunidad). Se parte de las siguientes premisas:

- El concepto de sustentabilidad se define a partir de cinco atributos generales de los agroecosistemas o sistemas de manejo: a) productividad; b) estabilidad, confiabilidad y resiliencia; c) adaptabilidad; d) equidad, y e) autodependencia (autogestión)
- La evaluación de sustentabilidad se lleva a cabo y es válida solamente para sistemas de manejo específicos en un determinado lugar geográfico y bajo un determinado contexto social y político y una escala espacial y temporal también previamente determinada
- La evaluación de sustentabilidad es una actividad participativa que requiere de una perspectiva y un equipo de trabajo interdisciplinarios.
- La sustentabilidad no puede evaluarse *per se* sino de manera comparativa o relativa
- La evaluación de sustentabilidad es un proceso cíclico que tiene como objetivo central el fortalecimiento tanto de los sistemas de manejo como de la metodología utilizada

Operativamente se define una serie de puntos críticos para la sustentabilidad del sistema de manejo que se relacionan con tres áreas de evaluación (ambiental, social y económica). En cada área de evaluación se definen criterios de diagnóstico e indicadores. Este mecanismo asegura una relación clara entre los indicadores y los atributos de sustentabilidad del agroecosistema. La información obtenida mediante los diferentes indicadores se integra finalmente utilizando análisis multicriterio, con





el fin de emitir un juicio de valor sobre los sistemas de manejo y brindar sugerencias para mejorar su perfil socioambiental. Para aplicar la metodología se propone un ciclo de evaluación que comprende los siguientes elementos o pasos:

- Determinación del objeto de la evaluación. En este paso se definen los sistemas de manejo que se han de evaluar, sus características y el contexto socioambiental de la evaluación
- Determinación de los puntos críticos que pueden incidir en la sustentabilidad de los sistemas de manejo
- Selección de indicadores. Aquí se determinan los criterios de diagnóstico y se derivan los indicadores estratégicos para llevar a cabo la evaluación
- Medición y monitoreo de los indicadores. Este paso incluye el diseño de los instrumentos de análisis y la obtención de la información deseada
- Presentación e integración de resultados. Aquí se compara la sustentabilidad de los sistemas de manejo analizados y se indican los principales obstáculos para la sustentabilidad, así como los aspectos que más la favorecen
- Conclusiones y recomendaciones. Por último, en este paso se hace una síntesis del análisis y se proponen sugerencias para fortalecer la sustentabilidad de los sistemas de manejo, así como para mejorar el proceso mismo de evaluación

PRINCIPALES ENFOQUES EN LA EVALUACIÓN DE APTITUD APLICABLES A LA ESCALA MUNICIPAL Y REGIONAL

La valoración del *uso potencial de un territorio se ha hecho desde tres perspectivas: 1) capacidad (land capability) inherente a las clases de terreno evaluadas, 2) evaluación de tierras (land evaluation) para sistemas productivos específicos, lo cual supone asimismo una evaluación económica complementaria (enfoques vigentes, respectivamente, desde los años 60 y 70 del siglo XX), y, más recientemente, mediante sistemas expertos de apoyo a la toma de decisiones (decision support systems, utilizando análisis multi-criterio (multi-atributo y multi-objetivo; Malczewski 1999 y 2004).*





Clasificación de la capacidad de los terrenos y modificaciones para México

El enfoque más antiguo de evaluación se denomina *Land Capability Classification* o Clasificación de la capacidad de los terrenos, y fue formulado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (Klingebiel y Montgomery 1961). Posteriormente, fue revisado y se formuló la denominada Evaluación de tierras y de sitio (*Land Evaluation and Site Assessment* (LESA); véase Steiner *et al.* 1987). La capacidad de uso de la tierra se define como la calidad que ofrece un terreno para permitir el establecimiento de un cierto número de alternativas de uso. Los terrenos en una categoría de clasificación de capacidad de uso dada pueden requerir prácticas de manejo y conservación diferentes, dependiendo del factor o factores limitantes.

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (antes Servicio de Conservación de Suelos, de la USDA) clasifica cualquier porción de territorio en ocho clases de capacidad, con base en criterios de fertilidad, riesgo de erosión o deterioro, y dificultad para el uso del suelo. Las clases 1 a 4, inclusive, presentan grados progresivos de dificultad para el desarrollo de cultivos; las clases 5 a 7, inclusive, muestran una gradación similar pero con relación al desarrollo de pastos o bosques. La clase 8 corresponde a terrenos inadecuados para la agricultura, la ganadería y la actividad forestal (Colegio de Posgraduados 1991). Las categorías son:

- Clase I. Suelos con pocas limitaciones que restrinjan su uso; cuando se presentan se corrigen fácilmente
- Clase II. Suelos que presentan algunas limitaciones, mismas que reducen la selección de plantas (cultivos), o bien que requieren de un moderado número de prácticas de conservación
- Clase III. Suelos que presentan severas limitaciones, mismas que reducen la selección de plantas, o bien que requieren de prácticas especiales de conservación, o ambas
- Clase IV. Suelos que presentan muy severas limitaciones, que restringen la selección de plantas, requieren de manejo muy cuidadoso, o ambas





A partir de la siguiente clase se consideran terrenos generalmente no aptos para cultivos (sin tratamiento mayor)

Clase V. Suelos que presentan poca o nula susceptibilidad a la erosión, pero tienen otras limitaciones que no pueden ser eliminadas; su uso queda limitado al pastoreo, aprovechamiento forestal, manejo de la vida silvestre, y como cobertura protectora

Clase VI. Suelos que presentan severas limitaciones que los hacen no aptos para cultivos; su uso queda limitado al pastoreo, aprovechamiento forestal, manejo de la vida silvestre (incluso como cobertura protectora), pero mediante prácticas de manejo específicas

Clase VII. Suelos que presentan limitaciones severas para pastoreo y aprovechamientos forestales; el uso adecuado de estos recursos sólo es posible bajo estrictas prácticas de manejo

Clase VIII. Suelos y formas del terreno donde no es posible el pastoreo o el aprovechamiento forestal, por lo que su utilización debe orientarse sólo a fines recreativos, vida silvestre, abastecimiento de agua o con fines estéticos

Para definir las ocho clases por su capacidad de uso se consideran los factores del medio ambiente, terreno y suelo, que sirven para fijar las normas sobre su uso y las prácticas de conservación y manejo a seguir en cada caso especial. Las limitantes mencionadas a nivel de clase se identifican a nivel de subclase, y son de cuatro tipos: riesgo de erosión (e), problemas de humedad excesiva, drenaje o inundación (w), otras limitaciones en el solum (o área radicular, *root zone* en el original) (s), y limitantes climáticas (c). El nivel de subclase proporciona información sobre el tipo y la intensidad de la limitación. Al carecer de limitantes, la clase I no tiene subclases.

Sistema de evaluación de tierras para uso potencial (INEGI)

El enfoque de la USDA ha sido adaptado a las condiciones mexicanas por el Colegio de Posgraduados y por la entonces Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), (actualmente Dirección General de Geografía, DGG del





Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI), quien elaboró cartografía a 1:250 000 sobre uso potencial para propósitos agropecuarios, forestales y de riesgo al deterioro ambiental.

CETENAL, para el caso de México, formuló el Sistema de evaluación de tierras para el uso potencial (INEGI, inédito), donde subdivide las ocho clases originales del sistema según la orientación de los productos a obtener, la mecanización en los trabajos agrícolas y el riesgo al deterioro ambiental. El método propone que el uso potencial de la tierra está condicionado por los factores físicos, químicos, climáticos y fisiográficos; no se consideran atributos sociales, culturales y económicos. Parte de una primera consideración de las unidades fisiográficas de la DGG, mismas que posteriormente son manipuladas, a mayor detalle, en subunidades con límites discernibles y que comparten características comunes, principalmente relacionadas con la pendiente (la cual se determina en mapas topográficos escala 1: 50 000), el tipo de suelo, la geología, el clima (datos de precipitación y temperatura extraídos de la carta de climas escala 1:1 000 000) y la vegetación. Posteriormente, se realiza una verificación de campo, donde se miden con precisión los factores ambientales que conforman algunos de los diferentes tipos de unidades consideradas. De esta manera, por extrapolación, es posible caracterizar la totalidad del área de estudio con respecto a pendiente, profundidad del suelo, obstrucción superficial, inundación, erosión, etc. Estos atributos se confrontan espacialmente con los valores derivados de los cuadros de criterios técnicos requeridos por los diferentes tipos de utilización (agrícola, pecuaria y forestal). De esta manera se hace posible determinar el tipo de utilización más adecuado y el grado o intensidad (niveles de aptitud) con que pueden llevarse a cabo.

CONDICIONES AMBIENTALES

Se consideran condiciones ambientales a los componentes y atributos del medio natural que muestran alguna relación con los procesos de producción para el uso de la tierra (cuadros 1 y 2). Las condiciones ambientales ejercen influencia sobre los procesos biológicos en el crecimiento de las plantas y sobre la posibilidad de utilización de implementos agrícolas como el tractor, para la agricultura mecaniza-





da, el arado egipcio o yunta para la agricultura con tracción animal y la coa o azada para la agricultura manual. Para la determinación de las clases de capacidad de uso agrícola, pecuario y forestal se consideran las siguientes condiciones ambientales, derivadas de la cartografía temática de INEGI a escala 1:250 000:

Pendiente. Se considera el grado de inclinación con respecto a la horizontal que posee un terreno; define terrenos irregulares o uniformes (ya nivelados) y mide la pendiente del terreno que determina, por un lado, la posibilidad de realizar actividades agrícolas con maquinaria y la posibilidad de establecer sistemas de riego (sin riesgo de deterioro), movilidad del ganado (para uso pecuario), y la extracción de los productos forestales.

Profundidad efectiva del suelo. Es la distancia comprendida desde la superficie del suelo hasta el límite superior de la roca, horizonte cementado, horizonte inerte, o cualquier horizonte con alguna limitante química, tal como sodicidad, acidez o salinidad, que interfiera con el desarrollo radicular de las plantas cultivadas.

Obstrucción superficial o interna. Se refiere a todos aquellos obstáculos físicos presentes en la superficie del suelo o dentro de él, que interfieren en el desarrollo de las actividades agropecuarias (pedregosidad o afloramientos rocosos).

Erosión. Se considera la erosión antrópica o acelerada, que puede ser por acción del viento o del agua, provocada por la perturbación del medio natural, usualmente debido a las actividades humanas.

Vegetación. La cubierta vegetal se considera desde el punto de vista del grado o intensidad con que ésta puede ser aprovechada para propósitos de alimentación del ganado o con fines de aprovechamiento forestal.

También se toman en cuenta otras condiciones ambientales como: el drenaje interno del suelo, la permeabilidad, su textura (que determina junto con la pendiente y la profundidad, el grado de retención de humedad aprovechable), la inundación, la inestabilidad del terreno, el hidromorfismo, la sodicidad y la fijación de fósforo.

El uso potencial de la tierra resulta, entonces, un indicador de la capacidad que posee un terreno para su aprovechamiento, considerando las condiciones ambientales (incluyendo el tipo de vegetación que lo caracteriza), las cuales determinan el tipo de utilización e intensidad (agrícola, pecuario y forestal) que puede dársele. La *capacidad de uso de la tierra* es la cualidad que presenta un terreno





para permitir el establecimiento de un cierto número de alternativas de uso. Esta capacidad será mayor, cuanto más amplia sea la gama de alternativas para llevar a cabo. Por lo tanto, cada tipo de utilización de la tierra ya sea agrícola, pecuario o forestal, presenta diferentes clases de capacidad de uso (agricultura mecanizada, manual, uso forestal comercial, etc.).

El uso potencial agrícola depende de las condiciones ambientales que posee un terreno para el desarrollo de cultivos (climáticamente adaptados a la zona), la realización de un determinado tipo de labranza y, si las condiciones ambientales lo permiten, establecer infraestructura para riego con el propósito de impulsar un manejo adecuado y, a la vez, evitar su deterioro. Cada clase de capacidad de uso agrícola (agricultura mecanizada, tracción animal o manual) está definida por una serie de criterios biológicos como el desarrollo de los cultivos, y criterios técnicos como la labranza o el establecimiento de riego, los cuales tienen diferentes grados o niveles para poderse llevar a cabo, dependiendo de las condiciones ambientales.

Las clases de capacidad de uso agrícola se asignan dependiendo del tipo de instrumento utilizado para la labranza del suelo.

- Tierras aptas para agricultura mecanizada
- Tierras aptas para agricultura con tracción animal
- Tierras aptas para agricultura manual

A su vez, estas clases de capacidad se dividen en continua y estacional. La continua depende de que las condiciones ambientales permitan realizar obras para riego, o bien que por el tipo de clima se puedan establecer más de un ciclo agrícola al año. La estacional ocurre cuando el régimen de lluvias es de una sola temporada, verano o invierno, y las condiciones ambientales no permiten el establecimiento de infraestructura para riego.

Los criterios biológicos y técnicos para la definición de los tipos de utilización agrícola de la tierra son:

El desarrollo de los cultivos. Se refiere a la medida en que las condiciones ambientales permiten el crecimiento y adaptación en un terreno, a los cultivos climáticamente adaptados en una región.





El procedimiento de labranza. Se refiere a los aspectos relativos a las prácticas agrícolas, los instrumentos, maquinaria y otros implementos agrícolas que se utilizan para llevar a cabo actividades de producción, por lo que se considera desde el acondicionamiento o preparación del terreno, hasta la última labor requerida para obtener el producto agrícola.

El suministro de agua. Es un criterio técnico que se refiere al carácter de la fuente de aprovisionamiento de la humedad que requieren las plantas cultivadas durante sus diferentes etapas fenológicas.

A partir de la combinación de los tipos de labranza y la forma de suministro de agua, es posible establecer seis tipos de utilización de la tierra o clases de capacidad de uso agrícola:

- Agricultura mecanizada con posibilidades de riego
- Agricultura mecanizada estacional (de temporal)
- Agricultura de tracción animal con posibilidades de riego
- Agricultura de tracción animal estacional (de temporal)
- Agricultura manual continua (de temporal)
- Agricultura manual de estacional (de temporal)

El uso potencial forestal depende de las condiciones de la vegetación que permitan un aprovechamiento sustentable a través de un manejo adecuado. A partir de la naturaleza y condición de la vegetación se determina la orientación económica que se le puede dar a la vegetación, es decir, las clases de capacidad de uso. Los criterios técnicos para la definición de las clases de capacidad de uso forestal son:

Condición de la vegetación actual. Se refiere a las características de la vegetación dominante que se encuentra en un terreno, lo que permite distinguir el tipo de aprovechamiento.

Posibilidades de extracción de los productos forestales. Se refiere a la medida en que las características físicas de un terreno permiten el corte y/o transporte de los elementos aprovechables de la vegetación natural.

De esta manera se consideran las siguientes clases de capacidad de uso forestal:





CUADRO 1. CONDICIONES AMBIENTALES QUE DETERMINAN LAS CLASES DE CAPACIDAD DE USO AGRÍCOLA

Condiciones ambientales Criterios	Desarrollo de cultivos	Procedimiento de labranza	Suministro de agua (riego)
Topografía		X	X
Profundidad del suelo	X	X	X
Obstrucción		X	X
Inundación	X	X	X
Hidromorfismo	X		
Drenaje interno	X	X	X
Salinidad	X		
Sodicidad	X		
Acidez	X		
Fijación de fósforo	X		
Inestabilidad (dunas)	X	X	X

CUADRO 2. CONDICIONES AMBIENTALES QUE DETERMINAN LA CLASE DE USO POTENCIAL FORESTAL

Condiciones ambientales Criterios	Condición de la vegetación	Extracción de los productos forestales
Topografía		X
Obstrucción		X
Inundación		X
Tipo de vegetación	X	

- Terrenos aptos para la obtención de productos maderables y no maderables
 - a) Con orientación comercial
 - b) Con orientación doméstica
- Terrenos aptos para la obtención de productos maderables
 - a) Con orientación comercial
 - b) Con orientación doméstica
- Terrenos aptos para la obtención de productos no maderables





- a) Con orientación comercial
- b) Con orientación doméstica
- Terrenos no aptos para la explotación forestal

El sistema de la USDA presenta ocho clases de aptitud genéricas, basadas en el efecto combinado de clima y características de suelo/relieve, tomando en consideración riesgos de erosión y medidas de conservación, si son necesarias. El sistema del INEGI desglosa esas ocho clases en 19 clases: seis para agricultura, 12 para forestería y una sin aptitud. A diferencia del enfoque de la USDA, el INEGI define expresamente el tipo y la magnitud de las limitaciones, principalmente por pendiente u obstrucción superficial. En el caso de las clases para uso forestal, INEGI las define en función de la pendiente y la obstrucción superficial, pero las separa tanto por cobertura y condición de la masa forestal (media, baja o variable), como por la orientación del aprovechamiento forestal (comercial o doméstico).

Las principales desventajas del sistema de la USDA residen en la generalidad de los resultados y en que asume altos niveles tecnológicos, circunstancia que no se aplica generalmente para el caso de México. La adaptación del INEGI trata de solventar esa circunstancia, pero las clases resultantes no dejan de ser genéricas, pero identificables a través de análisis espacial de los datos al 1:250,000 (para todo México).

EVALUACIÓN DE TIERRAS

Hace más de 20 años (FAO 1984), la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) reconoció que los métodos utilizados hasta entonces para la evaluación de las potencialidades de los terrenos se encontraban muy centrados en las características físicas de la evaluación, dejando en un papel poco relevante a las actividades del hombre sobre el terreno. Planteó también que el manejo debía jugar un papel importante en la conservación o degradación de la tierra, ya que era el aspecto más dinámico del sistema de uso del suelo. Así, la evaluación de tierras fue definida como el proceso de





valoración del comportamiento de la tierra cuando ésta se usa para propósitos específicos (FAO 1984). Uno de los objetivos de la evaluación de tierras es determinar el mejor manejo y las medidas a implementar para cada tipo alternativo de uso del suelo. La viabilidad de cualquier plan recomendado de uso del suelo, se aceptó, dependerá del conocimiento de las necesidades y circunstancias de los usuarios de la tierra; por lo tanto, la tierra debe evaluarse no sólo en el contexto ambiental y económico, sino y especialmente, en el contexto social del área de interés. De este modo, el proceso de evaluación de tierras se entiende como la valoración de la sustentabilidad de usos alternos en unidades territoriales dadas. Este proceso incluye:

- 1) Identificación, selección y descripción de los tipos de uso del terreno relevantes en el área bajo consideración.
- 2) Cartografía y descripción de los diferentes tipos de terrenos que se encuentran en el área; y
- 3) La valoración de la sustentabilidad de los diferentes tipos de terrenos para los tipos de uso seleccionados (FAO 1992, 1993).

En una evaluación de tierras los planificadores del uso del suelo cotejan áreas relativamente homogéneas de terreno denominadas unidades cartográficas (UC), con usos de la tierra denominados tipos de utilización de la tierra (TUT) (Beek 1978) para determinar, de esta forma, la aptitud relativa de cada área para cada uso específico (Rossiter 1996). Con el objeto de evaluar la sustentabilidad de la tierra para un uso determinado son esenciales dos grupos de datos: los que describen los recursos de la tierra y los que detallan los requerimiento de los tipos de utilización de la tierra (Ponce-Hernández 1984).

Durante el proceso de evaluación de tierras, cada unidad de terreno (UC) es valorada con respecto a su aptitud para satisfacer los tipos de uso del suelo (TUT) seleccionados. Las características biofísicas de las unidades de terreno involucradas pueden ser las existentes o después de mejoras por cambios permanentes en las condiciones del terreno. El tipo de uso del suelo es especificado en términos de atributos socio-económicos y técnicos, con sus requerimientos. Los atributos





principales, o clave, mencionados son: tipo de producto, intensidad de labor, intensidad de capital, nivel de conocimiento técnico, tamaño de la unidad de producción y relaciones de tenencia de la tierra (FAO 1992).

Los tipos de utilización del terreno (TUT) están especificados por un conjunto de requisitos de uso de la tierra (RUT), que no son más que las condiciones necesarias de la tierra para la exitosa y sostenida práctica de un TUT dado (Rossiter 1996). Los requerimientos del uso del suelo son condiciones biofísicas que afectan el rendimiento y la estabilidad del rendimiento del tipo de uso del suelo (requerimientos ecológicos), manejo en el tipo de uso del suelo (requerimientos de manejo) y la sustentabilidad del tipo de uso del suelo (requerimientos de conservación). Estos requerimientos se expresan en términos de calidad del terreno (FAO 1992).

En el contexto de la evaluación de tierras, el terreno incluye todos los componentes biofísicos del ambiente que ejercen influencia sobre el uso del suelo. Tales componentes son el clima, la geoforma, el tipo de suelo, la hidrología superficial, la flora y la fauna, incluyendo los efectos más permanentes de actividades humanas presentes o pasadas sobre estos componentes. El terreno es descrito de acuerdo a sus cualidades actuales, o cuando se consideran mejoras a implementar, de acuerdo con las cualidades predichas después de la implementación de esas mejoras. Las unidades de tierra son definidas por los valores de un conjunto de características de la tierra (CaT), las cuales son atributos sencillos que pueden ser medidos o estimados. Los valores de las características de la tierra se combinan en niveles de cualidades de la tierra (CuT), que a su vez son atributos complejos que pueden influir en su aptitud (Rossiter 1996).

Las cualidades del terreno son determinadas por sus propiedades biofísicas observables o cuantificables (Cat) (por ejemplo, el régimen de precipitación pluvial, la pendiente, la profundidad del suelo, el drenaje del suelo, el pH, etc.). Los requerimientos de uso del terreno expresan las demandas de una utilización de la tierra dada, mientras que las cualidades del terreno expresan la oferta, es decir, lo que un área particular puede proveer para un fin específico. Un requerimiento es una condición necesaria o deseable para la exitosa y sostenida práctica del tipo de uso del suelo. Al confrontar los requerimientos con las cualidades del terreno





se valora la sustentabilidad del tipo de uso del suelo definido en una unidad dada. Esta valoración involucra estimaciones de la cantidad y calidad del producto obtenido de cada unidad de terreno, basada en las características de la tierra y los requerimientos y el manejo definido en la descripción de cada uno de los tipos de uso del suelo establecidos (FAO 1992).

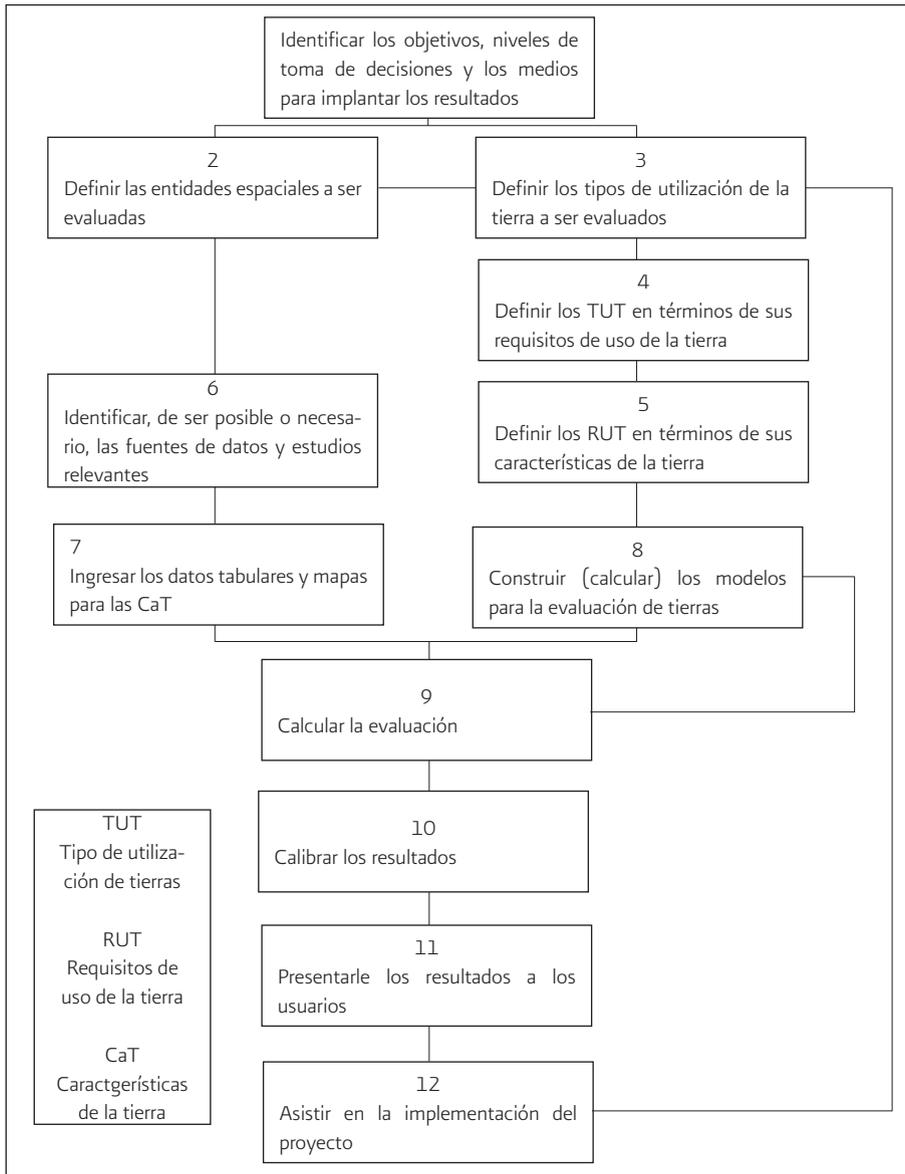
Cuando se comparan características y cualidades de la tierra con requerimientos del uso del suelo, por unidades de tierra y tipos de utilización, puede existir una gran discordancia entre los límites de la unidad de tierra y los límites del tipo de utilización. La unidad de tierra puede incluir más de un tipo de utilización y un tipo de utilización puede ser sugerido en más de una unidad de tierra. Los atributos de utilización dependerán de las características del área en cuestión, y posteriormente se consideran datos de manejo, rendimiento, tipo de fuerza utilizada, etc. Los datos obtenidos se procesan en forma matricial por métodos multivariados mediante un programa de cómputo *ad hoc* denominado ALES (Automated Land Evaluation System; Rossiter 1990). ALES es un sistema experto que permite la construcción de árboles de decisión, retomando en forma sintética las diversas aproximaciones de FAO (1976, 1983, 1984, 1985). Puede ser utilizado tanto a escala regional o de proyecto particular de manejo. Las entidades que evalúa el programa son unidades cartográficas homogéneas, derivadas de una delimitación de unidades territoriales, tal como, por ejemplo, una regionalización ecológica.

ALES es, en sí mismo, el marco de trabajo de FAO en forma computarizada dentro del cual los evaluadores pueden construir sus propios modelos. Proporciona un mecanismo de razonamiento y limitantes para que el evaluador formule inferencias. Dentro de este marco los evaluadores construyen sus propios sistemas expertos, que serán utilizados en la evaluación de tierras (Rossiter, 1990). El sistema opera con los datos derivados de un levantamiento morfoedafológico y de utilización para cada una de las unidades cartográficas; dichos datos están referenciados geográficamente, y se presentan en forma de mapas, por lo que los sistemas de información geográfica (SIG) representan una importante herramienta de apoyo en la alimentación de los datos al sistema de cómputo (ALES).

En ALES, cada evaluación consiste de un conjunto de tipos de utilización de terreno (TUT), o usos de la tierra propuestos, y de un conjunto de unidades cartográficas.



FIGURA 1. DIAGRAMA DE LA ESTRUCTURA GENERAL DEL PROCESO DE LA EVALUACIÓN DE TIERRA. TOMADO DE ROSSITER 1990



ficas (UC), es decir, las áreas de terreno a ser evaluadas. Cada unidad cartográfica es valorada por su aptitud para cada tipo de utilización de la tierra, obteniéndose como



resultado una matriz donde se describen los diferentes grados de aptitud de cada UC para cada TUT y viceversa (Rossiter 1990). En el sistema de la FAO se definen dos tipos de aptitud: física y económica, y a ambas pueden ser evaluadas en ALES. En el diagrama mostrado en la figura 1 de la estructura general del proceso de evaluación de tierras, ALES se involucra solamente en los pasos 7, 8, 9 y 10.

Una evaluación física indica el grado de aptitud para un uso de la tierra, sin considerar las condiciones económicas. Este tipo de evaluación enfatiza los aspectos relativamente permanentes de la aptitud (clima y condiciones edáficas), en lugar de los más fácilmente cambiables (precios). La evaluación tiende a concentrarse en los riesgos o peligros (ambientales), o en las limitaciones absolutas (clima) que se presentan al implantar un tipo de uso de la tierra dado en un área determinada (Rossiter 1990). En ALES, las entidades utilizadas como base para construir los modelos de evaluación, es decir, las características del terreno, son más convenientemente manejadas en forma de datos clasificados. Esto es, valores de datos que están dentro de un pequeño y finito conjunto de posibilidades. Estos valores pueden ser ordinales (con una escala continua) o nominales (Rossiter 1990).

La evaluación que hace ALES de cada unidad de tierra para cada tipo de utilización se efectúa según el siguiente proceso. Primero determina los valores actuales de las características de la tierra para cada unidad cartográfica. Después combina los valores de dichas características para generar los valores de las calidades de la tierra. Posteriormente armoniza los valores de las calidades con los requerimientos de uso de la tierra. Por último combina los valores de las calidades de la tierra para generar clases de aptitud, tanto ecológica como económica (Rossiter 1990).

En la construcción de modelos, ALES trabaja con claves jerárquicas multidireccionales denominadas árboles de decisión, en donde las hojas representan los resultados, tales como rangos de calidades de tierras, y los nodos interiores del árbol (puntos de las ramas) son criterios de decisión. Estos árboles son elaborados por el constructor del modelo y examinados durante el cálculo del resultado de la evaluación a partir de datos reales de la tierra. Los árboles de decisión se utilizan para determinar los niveles de los factores (niveles de aptitud) de las calidades del terreno (CuT), a partir de valores de las características del terreno (CaT); los ren-





dimientos proporcionales esperados a partir de valores de calidades del terreno; las subclases de aptitud física, también a partir de valores de las CuT; y valores de CaT clasificadas, a partir de valores de otras CaT.

El evaluador es la persona que efectúa la evaluación de tierras. Debe entender los conceptos y metodologías involucradas y ser capaz de utilizar las herramientas computarizadas que sean necesarias. Actúa como intermediario entre los tomadores de decisiones y los expertos. Los tomadores de decisiones son los poseedores de la unidad productiva o las instancias de decisión que determinan los destinos de la tierra en los procesos productivos. Estas personas, con apoyo de los expertos en el uso y recursos de la tierra, definen que sistemas productivos a evaluar y con base en qué necesidades y características escogerlos.

Unidades de paisaje y análisis multicriterio para la planificación del territorio

INTRODUCCIÓN

La participación pública en la toma de decisiones ha hecho evidente que las sociedades no son homogéneas y existen diferentes percepciones y valores que influyen en el uso que ha de darse al territorio (Smith *et al.* 1995). Es prioritario encontrar combinaciones de uso del suelo y su distribución en el espacio que nos permitan minimizar los conflictos sociales y a la vez asegurar un uso sustentable de los recursos en un territorio dado.

La magnitud y complejidad de los problemas ambientales promovió el desarrollo de diversas áreas del conocimiento, tales como la planeación del paisaje (Fabos 1985), la ecología del paisaje (Troll 1971, Forman y Godron 1996, Zonneveld 1995), la evaluación del impacto ambiental (Morgan 1998), el manejo de ecosistemas (McGarigal 1998), la planeación rural (Golley y Bellot 1999), la planeación ecológica del paisaje (Ahern 1999) y la planeación sustentable del suelo (Botequilla y Ahern 2002). Independientemente de la diversidad de enfoques, todas tienen en común el reconocer la relevancia del análisis de la aptitud territorial para diversos fines. Cada una de estas disciplinas ha propuesto y aplicado diversas metodologías para la planeación ecológica (cuadro 3).



CUADRO 3. COMPARACIÓN DE FASE O ETAPAS DE PLANEACIÓN EN ALGUNAS METODOLOGÍAS DE PLANEACIÓN ECOLÓGICA (BOTEQUILLA Y AHERN 2002)

Plantación del paisaje	Ecología del paisaje	Evaluación de impacto ambiental	Manejo de ecosistemas	Planeación rural	Planeación ecológica del paisaje	Planeación sustentable del suelo
Fabos 1985	Forman 1995	Morgan 1998; Tweek 1999 Búsqueda	McGarigal 1998	Golley and Bellot Ahern 1999	Ahern 1999	Botequilla y Ahern 2002
Identificación de elementos y necesidades	Análisis funcional y estructural	Descripción del área de estudio: ambiental, socioeconómica y cultural	Definición de objetivos	Definición de objetivos y metas	Metas	Búsqueda de variables relevantes
Evaluación de recursos ambientales y socioeconómicos	Establecimiento de las relaciones entre estructura y función	Encuestas: i) limitaciones y requerimientos de uso del suelo; ii) evaluación de la calidad del suelo	Caracterización del área de estudio: ambiental, socioeconómica y cultural	Fase de inventario y participación pública	Evaluación de recursos participación pública	Análisis de participación pública (e.g., fortalezas, debilidades, oportunidades y peligros, SWOT)
	Proceso: ¿cómo es que funciona el paisaje?					
	Representación: ¿cómo describir el paisaje?	Consultas iniciales: objetivos, recopilación de datos, etc.				

CUADRO 3. CONTINÚA

Plantación del paisaje	Evaluación del paisaje actual funciona bien?	Ecología del paisaje	Estudios comparativos de aptitud del suelo, evaluación de coincidencias entre i) y ii); análisis socioeconómico, consideraciones de evaluaciones de impacto ambiental	Evaluación de impacto ambiental	Manejo de ecosistemas	Planeación rural	Planeación ecológica del paisaje	Planeación sustentable del suelo
Metas y objetivos		Evaluación basada en dos atributos: a) rareza, b) recuperación		Identificación y descripción de impactos ambientales	Necesidades de evaluación: identificación de variables	Diagnóstico del problema	Identificación de conflictos espaciales y diseño de conceptos espaciales	Diagnóstico

CUADRO 3. CONTINUÍA

Plantación del paisaje	Cambio: ¿cómo podemos alterar el paisaje? Escenarios	Ecología del paisaje	Evaluación de impacto ambiental	Manejo de ecosistemas	Planeación rural	Planeación ecológica del paisaje	Planeación sustentable del suelo
Desarrollo de planes alternativos	Cambio: ¿cómo podemos alterar el paisaje? Escenarios	Síntesis: establecimiento de prioridades de protección de la superficie	Predicción de impactos ambientales (algunas veces incluye desarrollo de alternativas de evaluación)	Búsqueda de soluciones; planes alternativos y su evaluación	Soluciones alternativas; su evaluación y contraste así como análisis costo-beneficio	Definición de estrategias de planeación	Prognosis: planes alternativos y evaluación; participación pública (e.g. fortalezas, debilidades, oportunidades y peligros, SWOT)
Selección de una alternativa	Impacto: ¿qué diferencias pueden causar los cambios que hacemos	Presentación de resultados, discusión de escenarios de manejo	Mitigación, participación pública	Puesta en marcha; incluye monitoreo	Instrumentación	Desarrollo de escenarios su evaluación; participación pública	Síntesis; puesta en marcha y monitoreo

CUADRO 3. CONTINÚA

Plantación del paisaje	Ecología del paisaje	Evaluación de impacto ambiental	Manejo de ecosistemas	Planeación rural	Planeación ecológica del paisaje	Planeación sustentable del suelo
Evaluación de escenarios decision: ¿debe cambiar el paisaje? ¿Cómo?	Evaluación posproyecto	Monitoreo	Monitoreo incluido en la fase anterior	Monitoreo	Puesta en marcha Monitoreo	



ANTECEDENTES

Durante la posguerra, la planeación (ecológica) del territorio comenzó a jugar un papel importante en Europa (Ackoff 1980), y a partir de los años 1970 empezó a aplicarse a la resolución de conflictos (Crowfoot y Wondolleck 1990). La planeación (o planificación) se define como la acción de tomar hoy un conjunto de decisiones sobre acciones (secuenciales o simultáneas) que se llevarán a cabo en un periodo futuro (Rosenblueth 2004). Ackoff (1980) reconoce las modalidades de planeación reactiva, proactiva y proactiva. Una forma especial de planeación proactiva es la planeación participativa, uno de los enfoques más utilizados en el ordenamiento ecológico del territorio a nivel local. La planeación participativa es un proceso de toma de decisiones que permite resolver conflictos o sistemas de conflictos en donde todos los afectados por la decisión deben estar involucrados. En adelante, en este documento, el término planeación describirá la planeación participativa.

A partir de la década de 1960 creció, a nivel mundial, la atención sobre el ambiente. A través de la evaluación del impacto ambiental (EIA), este componente se incorporó a todas las actividades humanas con impacto sobre el territorio (comunicaciones, transporte, desarrollo urbano, aprovechamiento forestal y agropecuario, manejo de recursos hídricos, etc.). A partir de entonces, el concepto de EIA se utilizó internacionalmente, influenciando fuertemente la legislación ambiental en otros países (González 1997, Botequilla y Ahern 2002).

La ecología del paisaje propone atención explícita en la dimensión espacial de los procesos ecológicos (Forman y Godron 1986). A partir de ello, se pueden delinear unidades discretas en el espacio o unidades del paisaje, que se subdividen en facetas, las cuales, a su vez, se componen de ecotopos (Farina 1997, Velazquez y Bocco 2003). Con esto es posible anticipar los procesos ecológicos en entidades espaciales, y por tanto ser considerados en un plan. Aunque el uso de mediciones sobre los componentes del paisaje que apoyan este conocimiento se ha limitado sólo a la investigación (Botequilla y Ahern 2002), esta disciplina ofrece una base científica poderosa para manejo, conservación y restauración de porciones de territorio (Naveh 2000).





En la medida que en los problemas ambientales están involucrados grupos sociales, sus acciones no concertadas son rara vez predecibles. Consecuentemente, el cambio en la organización y el funcionamiento del ambiente, esto es, la adaptación del paisaje, no puede ser controlada completamente y depende en gran medida de situaciones y valores locales en espacio y tiempo (Anthrop 2001).

TOMA DE DECISIONES

La toma de decisiones aparece cuando existe un conflicto (Malczewski 1999). Las decisiones ambientales generalmente las toman personas distintas a los interesados, por lo tanto las elecciones y etapas que justifiquen la toma de decisiones deben ser transparentes (Geneletti 2004). El proceso de análisis y toma de decisiones es un conjunto de acciones que permiten transformar la información disponible en instrucciones para orientar la elección (Ackoff 1981). Existen dos tipos de análisis, el estructurado y el no estructurado (Alter 1977). Los primeros dividen los problemas de toma de decisiones en partes pequeñas y las integran lógicamente, formando modelos simbólicos (Ackoff 1981) de manera que faciliten la elección. Este diseño permite el uso de datos cuantitativos y cualitativos (Malczewski 1999). El proceso de toma de decisiones presenta tres etapas: inteligencia, diseño y selección (Simon 1960; Sharifi y Herwijnen 2003, Forman y Selly 2001).

INTELIGENCIA

La inteligencia es la capacidad para entender y resolver problemas (DRAE 2001). Dentro del proceso de toma de decisiones es la primera etapa e involucra la búsqueda de conflictos ambientales en una región. Los datos obtenidos son procesados y examinados con el fin de ubicar la presencia o no de conflictos (Sharifi y Herwijnen 2003) y, por lo tanto, la relevancia de la toma de decisiones, planeación y realización o no de proyectos. Las fases de esta etapa son (Sharifi y Herwijnen 2003; Geneletti 2003):





- Definición de objetivos
- Definición del sistema (parte del territorio, relaciones entre usuarios, ambiente)
- Búsqueda (*search, scanning, screening* o *scooping*), o examen del sistema para descubrir si existe algún conflicto
- Conocimiento del comportamiento del sistema mediante la descripción ambiental y geográfica del área. Involucra la colecta y procesamiento de los datos temáticos relevantes para la identificación de conflictos y la creación de las bases de datos geográficos correspondientes
- Identificación de conflictos

DISEÑO

El diseño es la descripción o bosquejo verbal de algo (DRAE 2001). Esta etapa del proceso de toma de decisiones involucra la creación y análisis de los posibles cursos de acción, lo que incluye la generación y evaluación de alternativas (Simon 1960, Sharifi y Herwijnen 2003).

SELECCIÓN

La selección es la elección de una alternativa que satisfaga los objetivos y minimice el conflicto. Las fases por las que transita son, según Sharifi y Herwijnen (2003):

- Definición de criterios de comparación
- Predicción y medición de las consecuencias de la decisión tomada
- Evaluación y selección de alternativas (involucra análisis multicriterio)
- Decisión y explicación de la elección

Por lo general, las etapas de inteligencia, diseño y selección se estructuran por medio de sistemas de apoyo para la toma de decisiones (SAD), y se han considerado además dentro de las diversas metodologías para la planeación ecológica bajo distintos nombres, profundidad de análisis y subdivisiones. Varias metodologías han agregado a este proceso la etapa de monitoreo, con la premisa de que se





toman decisiones sobre sistemas dinámicos y que hay que utilizar el enfoque de manejo adaptativo (Holling 1978) (cuadro 3).

Modelo de análisis multicriterio-mltiobjetivo

LOS SISTEMAS DE APOYO PARA LA TOMA DE DECISIONES (SAD)

Estos sistemas se definen como un conjunto de programas de cómputo diseñados para ayudar a la toma de decisiones y su ejecución. Aparecen originalmente como una rama de las aplicaciones de cómputo para negocios con el fin de facilitar actividades de planeación y manejo de personal (Alter 1977). Los sistemas de apoyo para la toma de decisiones se han utilizado en una gran diversidad de disciplinas durante más de 35 años (Power 2003), desde la ingeniería (O'Connor *et al.* 1997) a la medicina (Thornett 2001), así como en aplicaciones ambientales y geográficas. Todos los SAD permiten la consulta de uno o varios de los criterios utilizados para la toma de decisiones; proporcionan mecanismos de análisis; permiten consultas de reportes agregados de consultas pre-especificadas (los SAD avanzados permiten nuevas consultas); ofrecen estimaciones de las consecuencias de las decisiones propuestas; y finalmente permiten tomar decisiones (Alter 1977).

Existen varias clasificaciones de SAD. Para este trabajo, la siguiente se considera pertinente:

1. *Basados en reglas.* Consisten en el apoyo a la toma de decisiones ofrecido por profesionales. Se trata de sistemas que ayudan al tomador de decisiones a pensar en las alternativas lógicamente (de manera estructurada). Se pueden representar en grandes diagramas de flujo. Las decisiones se toman siguiendo reglas que usualmente resultan del punto de vista consensuado de expertos en el campo de aplicación. Pueden ser utilizados por no profesionales en el área. Existen dos tipos (según Thornett 2001):
 - a. *Basados en los datos.* La decisión es enteramente dependiente de los datos que se proporcionan al sistema. Este tipo de SAD, a su vez, se subdivide en dos (modificado de Alter 1977):





- i) SAD de recuperación. Estos SAD permiten tener acceso inmediato a grupos de datos estructurados en una base de datos.
 - ii) SAD de análisis. Permiten la manipulación de los datos por medios u operadores generales (superposición simple, sumas agrupadas, divisiones simples entre campos); además, ofrecen acceso a series de datos y modelos sencillos.
- b. Basados en el objetivo. La decisión se selecciona de acuerdo a su relevancia para resolver el problema en cuestión (Thornet 2001). Se les denomina también modelos "contables", "de juicio" o "explicativos". Calculan las consecuencias de acciones planeadas con base en definiciones explicativas o juicios de valor (Alter 1977).
2. *Sistemas expertos*. Son sistemas capaces de contestar preguntas acerca de algún aspecto del conocimiento (por ejemplo, el uso del suelo) e integran datos que permiten tomar decisiones. Son capaces de seleccionar reglas adicionales basándose en un grupo de hipótesis. Un sistema experto proporciona una solución al mismo nivel que un experto humano, emplea razonamiento simbólico y basado en la experiencia; en algunos casos almacena el conocimiento de manera independiente a los procedimientos de inferencia y es capaz de ofrecer explicaciones del razonamiento empleado. Generalmente presentan líneas de acción que permiten generar soluciones óptimas, coherentes con una serie de restricciones. A este tipo de SAD corresponden los modelos de análisis multiobjetivo–multicriterio. Para tomar decisiones utilizan modelos probabilísticas o modelos de simulación (Thornet 2001).

Con el desarrollo de las bases de datos geográficos, de la capacidad analítica de los sistemas de información geográfica (SIG) y de la formulación de modelos espacialmente explícitos, se han podido desarrollar sistemas de apoyo para la toma de decisiones (SAD) más efectivos, que además permiten considerar la distribución espacial de los datos (véase en glosario "Sistemas espacialmente explícitos de apoyo para la toma de decisiones (SADS). Varias publicaciones ofrecen ejemplos de aplicación (entre otros, Bryan 2003; Forher *et al.* 2002; Thomas 2002; Matthews *et al.* 1999; Butcher *et al.* 1991).





ANÁLISIS MULTICRITERIO

El proceso de toma de decisiones multicriterio o análisis multicriterio comprende aquellos métodos que se utilizan en casos donde es necesario encontrar soluciones a problemas compuestos de múltiples alternativas de selección que se pueden evaluar por medio de características de desempeño, llamadas criterios (Eastman 2001, Jankowski *et al.* 2001). La evaluación de alternativas multicriterio a través de la comparación entre criterios comenzó en el ámbito militar y después se utilizó en administración de empresas. Las diferentes técnicas de comparación incluyen (Eckenrode 1965) el *ranking*, el *rating*, y la comparación por pares (con múltiples variantes). Entre sus principales características destacan que no requiere de unidades de medida común entre los criterios o atributos que componen el problema; además, garantiza un uso más flexible de la información disponible.

El análisis multicriterio tiene seis componentes (Malczewski 1999):

- El o los objetivos que se intentan lograr
- El tomador de decisiones o el grupo de tomadores de decisiones
- Un grupo de criterios de evaluación (divididos en objetivos secundarios o atributos) sobre los cuales se evaluarán los cursos de acción
- Las alternativas de decisión o variables de acción
- Las variables incontrolables o variables de estado de la naturaleza
- El estado deseado o futuro asociado a cada alternativa y su conjunto de atributos

El análisis multicriterio utiliza técnicas que permiten combinar la información de los criterios para obtener un índice sintético de desempeño por cada alternativa que facilite la toma de decisiones (Eastman 2001). Las técnicas de análisis para la toma de decisión multicriterio requieren, por lo tanto, que cada criterio se estandarice, se le asigne un valor de importancia con respecto a los demás criterios, y finalmente se evalúe en conjunto, con lo que se obtiene una evaluación de cada alternativa estu-





diada. Aún cuando existen diversas técnicas multicriterio, tanto su efectividad, las consecuencias de utilizar una u otra técnica, así como el diseño de nuevas formas de combinación y evaluación, están sujetos a investigación. El proceso de análisis multicriterio para decisiones se estructura en cinco etapas (Sharifi y Herwijnen 2003):

- Organización en objetivos y criterios.
- Interpretación de objetivos y criterios.
- Comparación entre criterios y objetivos.
- Asignación de pesos (valores de importancia relativa) a criterios y objetivos.
- Análisis de sensibilidad del modelo.

Los análisis multicriterio se subdividen en dos categorías: las decisiones multiatributo y las decisiones multiobjetivo (Sharifi y Herwijnen 2003):

- *Decisión multiatributo.* La toma de decisiones estructurada requiere que se analice el problema identificando las entidades que lo componen y la cantidad o calidad medible de dichas entidades o de la relación entre entidades; a este proceso se le denomina identificación de atributos (Malczewski, 1999). Las decisiones se pueden basar en un atributo o en varios, de allí su nombre. Cada atributo debe ser ponderado y combinado de acuerdo a criterios y reglas de decisión acordadas con los tomadores de decisiones. Al conjunto de reglas de decisión, criterios a utilizar y las posibles soluciones encontradas se les denomina técnicas de toma de decisión multiatributo.
- *Decisión multiobjetivo.* De la misma manera, la toma de decisiones requiere conocer los diferentes puntos de vista y aseveraciones que existan acerca del estado deseado del sistema bajo consideración (Malczewski 1999). A partir de estos puntos de vista del tomador de decisiones se estructuran las reglas de decisión (Eastman 2001, Forman y Selly 2001). Para cualquier objetivo dado es necesario proporcionar una serie de atributos que permitan medir el grado en que el objetivo ha de lograrse (Malczewski 1999). Un objetivo puede ser establecido por un grupo de interés o por varios, en el caso de ser varios grupos de interés se pueden dar dos casos (Eastman 2001):





- i) que los objetivos de cada grupo sean complementarios, es decir, que la o las modificaciones sobre la situación actual beneficien a los grupos de interés involucrados, o bien
- ii) que los objetivos sean conflictivos o contrapuestos, esto es, que la o las decisiones beneficien a uno o varios grupos al tiempo que se perjudica a los demás.

La decisión multiobjetivo se dedica al análisis y resolución de toma de decisiones que involucra a varios grupos de interés cuyos objetivos son conflictivos. Los métodos que permiten tomar decisiones multiobjetivo generalmente involucran decisiones multiatributo (Malczewski 1999).

Desde la década de 1980 se han desarrollado técnicas que facilitan la toma de decisiones asociada al territorio con el uso de SIG (Voogd 1983). En este caso, los criterios utilizados se relacionan con una o varias características espaciales que se extraen de una base de datos espacial (Eastman 2001). La asignación de pesos a criterios y objetivos dentro de este tipo de análisis multicriterio usualmente involucra la unión o intersección de condiciones. En el caso de que los criterios se expresen en distribuciones espaciales discretas (tal como el caso de las categorías de uso del suelo), es usual que se utilice lógica booleana para asociar los diferentes criterios, pero en el caso de criterios expresados en factores continuos es muy común utilizar combinaciones lineales ponderadas.

El utilizar técnicas multicriterio con SIG permite combinar y transformar datos espaciales y no espaciales (entrada) en una decisión (salida) espacialmente distribuida. Las reglas de decisión utilizadas en un modelo de esta naturaleza definen las relaciones entre los mapas de entrada y el mapa de salida. El método involucra el uso de datos geográficos, las preferencias o juicios del tomador de decisiones y la manipulación de preferencias y datos geográficos de acuerdo a reglas de decisión (Malczewski 2004).

Un problema con los enfoques multicriterio tradicionales aplicados a la evaluación de aptitud de uso de suelo es que no aseguran un patrón espacial compacto ni criterios de contigüidad entre las ubicaciones de los diferentes usos del suelo (Malczewski 2004). Por eso es necesario incorporar conceptos como el de unidades de paisaje en la planeación.







Estudio de caso utilizando el enfoque de evaluación de tierras. Análisis de aptitud en la cuenca del río Tepalcatepec, Jalisco-Michoacán

INTRODUCCIÓN

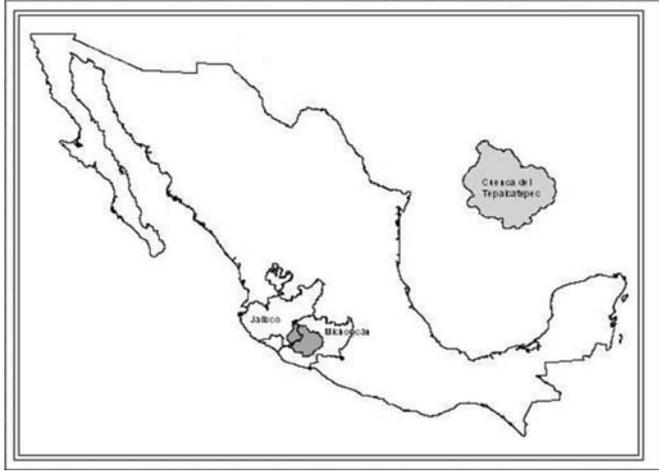
La cuenca del río Tepalcatepec se localiza en los estados de Jalisco y Michoacán y constituye el segundo afluente más importante de la región hidrológica del río Balsas; su superficie aproximada es de 17 mil km² (figura 2). La altitud en la cuenca varía entre 160 y 3 840 m.s.n.m., aunque el 90.5 % de su superficie se ubica entre 200 y 2 300 msnm. Este gradiente altitudinal, la conexión entre la Sierra Madre del Sur y el Sistema Volcánico Transversal, y la situación biogeográfica entre las regiones Neártica y Neotropical explica la intrincada y compleja diversidad de condiciones fisiográficas, climáticas y culturales que influyen en la distribución de los diversos componentes de los paisajes. El Valle del río Tepalcatepec, la Sierra de Jalmich, el Pico de Tancítaro y la Sierra Madre del Sur constituyen los principales rasgos fisiográficos de la cuenca (modelo sombreado, página siguiente). Casi la cuarta parte de la cuenca (23.4%) cuenta con clima semiárido caliente, más de una tercera parte (36.8%) tiene climas cálidos subhúmedos, casi otra cuarta parte (23.9%) está representada por los tipos semicálidos subhúmedos y sólo una sexta parte de la cuenca (15.9%) corresponde a tipos climáticos templados subhúmedos.

Las formas de relieve predominantes son los derrames de lava cubiertos de piroclastos sobre basaltos, laderas modeladas con disección fluvial severa en rocas





FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC



ígneas extrusivas y laderas modeladas con disección fluvial severa en rocas ígneas intrusivas. Los tipos de rocas predominantes son: basalto (28%), andesitas (9%), arenisca-conglomerado (8%), granito-granodiorita (8%), materiales aluviales (8%), riolitas-brechas volcánicas ácidas (5%), otras rocas ígneas (15%) y rocas sedimentarias (7%). Las laderas con mayor pendiente se presentan en un 55% de la superficie de la cuenca y se localizan al oeste y sur (10-20° y 20-35°). Las pendientes menores de 3° caracterizan al 21% del área y se presentan en el valle del río Tepalcatepec y las planicies cercanas a Cotija. Las pendientes intermedias (6-10°) caracterizan la mayor parte del sistema volcánico transversal (norte de la cuenca). Los suelos predominantes son andosoles con 22 %, que se ubican en la porción norte de la cuenca; vertisoles con 19 %, en la porción más baja de la cuenca, luvisoles con 14 %, dispersos en las porciones montañosas de la cuenca, y feozem con 12 %, principalmente al sur de la cuenca, en la Sierra Madre del Sur (figura 3 a color, página 8). Administrativamente la cuenca comprende 13 municipios completos y 30 parcialmente. De estos 43 municipios, 8 pertenecen a Jalisco y 35 a Michoacán, asimismo se asientan en ella 2 495 localidades, 572 en el estado de Jalisco y 1 923 en el estado de Michoacán (cuadro 4).





CUADRO 4. LISTADO DE MUNICIPIOS INCLUIDOS EN LA CUENCA DEL RÍO TEPAPALCATEPEC

Municipio	Estado	Superficie (km ²)
Jilotlán de los Dolores	Jalisco	1 468.0
Manuel M. Dieguez	Jalisco	774.1
Mazamitla	Jalisco	12.4
Pihuamo	Jalisco	1.1
Quitupan	Jalisco	632.2
Tamazula de Gordiano	Jalisco	210.4
Tecalitlán	Jalisco	580.6
Valle de Juárez	Jalisco	139.3
Aguililla	Michoacán	884.1
Apatzingán	Michoacán	1 630.6
Ario	Michoacán	601.6
Arteaga	Michoacán	85.9
Buenavista	Michoacán	902.7
Coacomán de Vázquez Pallares	Michoacán	239.7
Cotija	Michoacán	493.7
Charapan	Michoacán	22.3
Gabriel Zamora	Michoacán	437.7
Huacana, La	Michoacán	979.0
Jiquilpan	Michoacán	1.6
Marcos Castellanos	Michoacán	36.1
Múgica	Michoacán	378.3
Nuevo Parangaricutiro	Michoacán	214.6
Nuevo Urecho	Michoacán	326.7
Parácuaro	Michoacán	504.2
Paracho	Michoacán	6.3
Pátzcuaro	Michoacán	0.1
Peribán	Michoacán	324.9
Reyes, Los	Michoacán	435.2
Salvador Escalante	Michoacán	229.8
Tacámbaro	Michoacán	1.6





CUADRO 4. LISTADO DE MUNICIPIOS INCLUIDOS EN LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

Municipio	Estado	Superficie (km ²)
Tancítaro	Michoacán	770.1
Tangamandapio	Michoacán	96.8
Tangancicuaro	Michoacán	2.9
Taretan	Michoacán	184.8
Tepalcatepec	Michoacán	773.2
Tingambato	Michoacán	132.7
Tinguindín	Michoacán	138.4
Tocumbo	Michoacán	502.5
Tumbiscatio	Michoacán	694.7
Turicato	Michoacán	0.1
Turicato	Michoacán	9.5
Uruapan	Michoacán	833.7
Ziracuaretiro	Michoacán	159.8
Sub-total Jalisco		3,818.1
Sub-total Michoacán		13,035.9
Total de la cuenca		16,854.0

CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS PAISAJES NATURALES DE LA CUENCA

La caracterización y evaluación de los paisajes naturales de la cuenca del río Tepalcatepec parten de un marco conceptual dado por la regionalización geomorfo-edafológica de su territorio, el análisis del cambio en la cobertura vegetal y usos del suelo y la evaluación de la aptitud del territorio y su confrontación con los conflictos de uso, como pasos previos y necesarios encaminados al planteamiento de propuestas del ordenamiento ecológico de su territorio a nivel regional.

La regionalización en unidades de paisajes proporciona el marco espacial georreferenciado para la aplicación de las políticas de ordenamiento de un territorio (Bocco *et al.* 2001). Su propósito principal es generar una información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos, la estructura, composición y dinámica de los suelos, el agua y la vegetación. El cono-





cimiento de los cambios en la cobertura y uso del suelo proporciona la base para conocer las tendencias en los procesos de deforestación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de un territorio. El procedimiento más confiable para medir el grado de conversión ambiental por las actividades humanas es el estudio de la dinámica espacio-temporal de la cobertura vegetal. La evaluación de la aptitud del territorio (EAT), o evaluación de tierras, es un proceso de estimación del potencial de las tierras para uno o varios usos alternativos. Busca elucidar qué tanto se prestan las diferentes unidades de tierra para un determinado uso, sin deteriorarlas. El proceso consiste básicamente en una comparación entre los requerimientos de uso del suelo y los atributos de las unidades de tierras (Rossiter 1996).

Estos tres procesos, conjuntamente con el análisis socioeconómico y geográfico de la población humana culminan en la generación de propuestas de ordenamiento territorial al nivel regional. De allí su importancia en el diseño de políticas de planificación y manejo sostenibles de los patrimonios naturales de la cuenca del Tepalcatepec.

Cobertura vegetal

La vegetación es la expresión evolutiva del agregado de especies vegetales en un lugar y en un tiempo determinado. Como tal es un indicador del estado o condición que guardan los ecosistemas. Su expresión espacio-temporal es la cobertura vegetal. La cobertura de vegetación y usos del suelo constituyen la expresión conjunta de las plantas oriundas o introducidas y la utilización antrópica que se hace del medio biofísico de un área. Es una de las más importantes manifestaciones espaciales de los paisajes naturales y culturales de un territorio (Lambin *et al.* 2001; Farina 2000).

La cobertura vegetal (los atributos biofísicos de la superficie terrestre) y los usos del suelo (los distintos propósitos humanos con los que se aprovechan estos atributos) determinan el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: afectan directamente a su biodiversidad, contribuyen a los cambios climáticos locales, regionales y globales, y son las fuentes primarias de la degradación de los suelos.





La transformación perceptible y generalizable de la vegetación o los usos antrópicos a través de un intervalo de tiempo en determinada porción de terreno es reconocida como el análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo (ACCUS). De esta manera, el ACCUS es una herramienta para caracterizar una región y es un elemento básico del diagnóstico para el ordenamiento territorial. En la actualidad el ACCUS se considera el procedimiento más confiable para medir la deforestación, la alteración y la transformación de los usos del suelo y su dinámica a través del tiempo (Rounsevell *et al.* 2003, Mas *et al.* 2003).

La regionalización

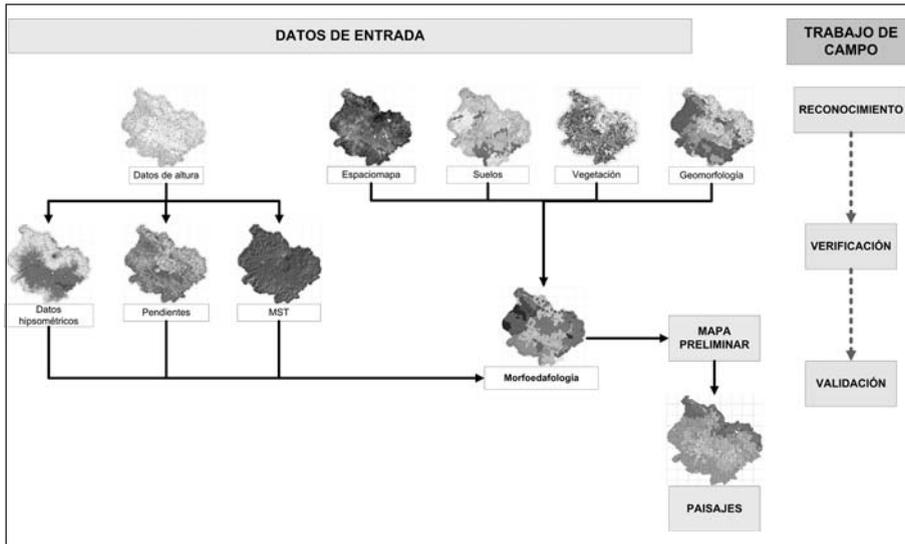
La regionalización de las propiedades biofísicas de los paisajes de la cuenca del río Tepalcatepec tiene el propósito de delimitar unidades relativamente homogéneas en función de sus rocas, relieves, suelos y coberturas vegetales. En la figura 4 se presenta el modelo de flujo general para la regionalización, representada a 1:250,000, pero basada en el análisis de 36 mapas topográficos a escala 1:50,000. Los resultados se expresan en *unidades de paisaje* y se representan cartográficamente en mapas que describen su compleja naturaleza biofísica. La base de datos topográficos describe el complejo mosaico de laderas, planicies, valles y otras unidades de relieve característicos de la cuenca.

LAS UNIDADES GEOLÓGICAS

La cuenca esta conformada en casi 58 % por rocas ígneas extrusivas, las cuales se localizan en el norte y centro de la cuenca, como parte del Sistema Volcánico Transversal y las porciones más norteñas de la Sierra Madre del Sur; 16 % por rocas sedimentarias, ubicadas al sur de la cuenca, constituyen la porción este de la Sierra Madre del Sur; 13 % por rocas ígneas intrusivas, las cuales afloran en la porción oeste de la cuenca y conforman parte de la Sierra Madre del Sur; y 9 % por materiales aluviales, localizados al fondo de la cuenca conformando las partes más planas de la misma, alrededor del río Tepalcatepec (cuadro 5). Los tipos de rocas predominantes son: basalto con 28 %, granitos-granodioritas con 8 %,



FIGURA 4. MODELO DE FLUJO GENERAL PARA LA REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC



arenisca–conglomerado con 8 % y Andesitas con 7 %; los materiales aluviales ocupan 8 % de la cuenca.

El Sistema Volcánico Transversal se diferencia en cinco unidades morfolitológicas:

- vulcanismo monogenético cubierto por grandes espesores de paleosuelos, cenizas y suelos
- vulcanismo monogenético formado de conos de ceniza y derrames de lava tipo Paricutín
- flujos piroclásticos, avalanchas de flujos de detritos, lahares y epiclásticas del Pleistoceno-Holoceno
- vulcanismo monogenético con volcanes semi-escudo (conos de lava) muy erosionados
- vulcanismo monogenético con volcanes semi-escudo (conos de lava) (mapa lito-morfológico).



CUADRO 5. CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC. DISTRIBUCIÓN DE LAS CLASES DE ROCA EN KM² Y PORCENTAJE

Clase de rocas	Superficie (km ²)	Superficie (%)
Ígnea extrusiva	9,844	58.4
Ígnea intrusiva	2,205	13.1
Sedimentaria	2,709	16.1
Metamórfica	492	2.9
Materiales aluviales	1,567	9.3

La Sierra Madre del Sur está conformada por tres grandes unidades morfológicas antiguas:

- arcos volcánicos terciarios, constituidos por granitos, lavas andesíticas, flujos piroclásticos, conglomerados, areniscas, limos, margas y calizas, intensamente deformados
- arcos volcánicos del terciario, formados por lavas andesíticas, intrusivos (dioritas), granitos y flujos piroclásticos
- secuencias vulcano sedimentarias del Tepalcatepec, compuestas por flujos piroclásticos, areniscas, conglomerados y rocas intrusivas, poco deformados (mapa lito-morfológico).

Por último, la porción más baja de la cuenca está formada por las dos unidades más recientes de la región:

- flujos piroclásticos, avalanchas de flujos de detritos, lahares y epiclásticas del Pleistoceno-Holoceno
- depósitos fluviales y fluvio-lacustres (Mapa Lito-morfológico).

LAS UNIDADES DE RELIEVE Y TERRENO

Una primera aproximación y descripción de las formas de terreno está dada por las características morfométricas del relieve de la cuenca. Dos de los principales





CUADRO 6. CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC. DISTRIBUCIÓN DE LOS RANGOS ALTIMÉTRICOS EN KM² Y PORCENTAJE

Rangos de altitud	Superficie (km ²)	Superficie (%)
< 200	157	0.9
200 – 500	3,981	23.6
500 – 800	2,768	16.4
800 – 1100	2,155	12.8
1100 – 1400	1,896	11.2
1200 – 1700	2,055	12.2
1700 – 2000	1,733	10.3
2000 – 2300	1,279	7.6
2300 – 2600	569	3.4
2600 – 2900	162	1.0
2900 – 3200	60	0.4
3200 – 3500	27	0.2

atributos morfométricos son la hipsometría o distribución de los rangos altitudinales (cuadro 6) y la distribución de los rangos de pendientes). Las pendientes muestran la distribución geográfica de la inclinación de las laderas de la cuenca (cuadro 7). Las mayores pendientes (10-20° y 20-35°) se localizan al oeste y sur de la cuenca, las cuales caracterizan a la porción más montañosa de la misma y ocupan una superficie equivalente al 55 % de la cuenca. Las menores pendientes (< 3°) caracterizan al valle del río Tepalcatepec y a planicies como las cercanas a la población de Cotija; estos rangos de pendiente ocupan el 21% de la superficie de la cuenca. Las pendientes intermedias (6-10°) caracterizan la mayor parte del Sistema Volcánico Transversal (norte de la cuenca).

Las formas de relieve predominantes en la cuenca son en orden decreciente: *derrames de lava* cubiertos de piroclastos sobre basaltos muy suavemente a suavemente inclinados (18 %), los cuales localizan en la porción norte de la cuenca; *pie demontes superior, medio e inferior* (14%), que conforman principalmente la zona de transición entre el Sistema Volcánico Transversal y el Valle del río Tepalcatepec; laderas modeladas con disección fluvial severa en rocas ígneas extrusivas





(14 %) y *laderas* modeladas con disección fluvial alta y muy alta en rocas ígneas extrusivas muy inclinadas (9 %), localizadas en principalmente al noreste y suroeste de la cuenca.

La leyenda del mapa geomorfológico incluye 13 unidades superiores, las cuales están conformadas por 59 formas de relieve: *planicies*, *altiplanicies*, *depresiones inter-lávicas*, *derrames de lava* cubiertos por piroclastos con distintos grados de pendientes, *conos volcánicos* piroclásticos y semiescudos, *laderas* en rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas con distintos grados de disección y pendientes, y por último los *valles* tanto acumulativos como erosivos (cuadro 8).

CUADRO 8. CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC. DISTRIBUCIÓN FORMAS DE RELIEVE EN KM² Y PORCENTAJE

Formas de relieve	Área (km ²)	Área (%)
Cono volcánico sobre basaltos	252.3	1.5
Cono volcánico de escoria y volcanoclastos sobre basaltos y brechas volcánicas básicas	368.0	2.18
Volcanes semiescudo sobre basaltos	362.9	2.15
Derrames de lava sobre basaltos	167.7	0.99
Derrames de lava cubiertos de piroclastos sobre basaltos	4161.8	24.69
Depresión volcánica sobre basaltos	30.7	0.18
Laderas modeladas con disección fluvial escasa	1.2	0.01
Laderas modeladas con disección fluvial escasa sobre complejo metamórfico	406.8	2.41
Laderas modeladas con disección fluvial escasa sobre rocas ígneas intrusivas	141.8	0.84
Laderas modeladas con disección fluvial escasa sobre andesitas	16.7	0.1
Laderas modeladas con disección fluvial escasa sobre rocas sedimentarias	147.9	0.88
Laderas modeladas con disección fluvial escasa sobre rocas extrusivas	180.5	1.07
Laderas modeladas con disección fluvial moderada	559.2	3.32





CUADRO 8. CONTINÚA

Formas de relieve	Área (km ²)	Área (%)
Laderas modeladas con disección fluvial moderada sobre rocas ígneas intrusivas	375.7	2.23
Laderas modeladas con disección fluvial moderada sobre basaltos	636.3	3.78
Laderas modeladas con disección fluvial moderada sobre rocas ígneas extrusivas	672.2	3.99
Laderas modeladas con disección fluvial moderada sobre rocas sedimentarias	56.1	0.33
Laderas modeladas con disección fluvial severa	234.4	1.39
Laderas modeladas con disección fluvial severa en rocas ígneas extrusivas	2282.4	13.54
Laderas modeladas con disección fluvial severa en rocas ígneas intrusivas	1737.7	10.31
Laderas modeladas por disección fluvial severa sobre rocas sedimentarias	783.6	4.65
Laderas modeladas con disección fluvial severa sobre andesitas	222.2	1.32
Laderas de lomerío cárstico con procesos de dolinización densa sobre calizas y lutitas areniscas	153.3	0.91
Laderas de lomerío cárstico con procesos de dolinización incipiente sobre calizas, areniscas y conglomerados	221.1	1.31
Laderas de meseta con disección fluvial escasa sobre materiales aluviales y andesitas	22.2	0.13
Laderas de meseta con disección fluvial moderada sobre materiales aluviales	4.3	0.03
Piedemonte acumulativo con disección escasa sobre materiales aluviales	705.7	4.19
Piedemonte acumulativo-erosivo con disección moderada sobre areniscas y conglomerados	779.5	4.62
Piedemonte erosivo con disección severa sobre conglomerados	117.4	0.7





CUADRO 8. CONTINÚA

Formas de relieve	Área (km ²)	Área (%)
Planicie cárstica con procesos de dolinización incipiente sobre caliza y lutitas-areniscas	116.4	0.69
Abanicos proluviales activos sobre materiales aluviales y tobás ácidas	2.8	0.02
Llanura lacustre sobre materiales aluviales y basaltos	288.8	1.71
Valle fluvial acumulativo sobre materiales aluviales, areniscas y conglomerados	386.5	2.29
Valle fluvial erosivo sobre rocas volcánicas estrusivas y conglomerado	227.9	1.35
Cuerpo de agua permanente	30.3	0.18

LA MORFOEDAFOLOGÍA

Las unidades morfoedafológicas predominantes son las laderas graníticas y volcánicas con Regosol, Feozem y Cambisol que cubren 10 % de la cuenca y se ubican en la porción suroeste de la cuenca en la Sierra Madre del Sur; los conos volcánicos y derrames lávicos ligera a moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con Andosol, Luvisol y Regosol, que ocupan el 8 % y se localizan en la zona norte de la cuenca; el piedemonte de flujos piroclásticos con Vertisol y Feozem, que tiene una superficie de 8 % y se localiza en la porción baja y central de la cuenca, al pie del Sistema Volcánico Transversal; y los derrames lávicos suave a moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con Andosol, Feozem y Luvisol que ocupan 5 % de la cuenca, y se ubican en el extremo este de la misma (cuadro 9).





CUADRO 9. CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC. UNIDADES MORFOEDAFOLÓGICAS EN KM² Y PORCENTAJE

Unidades morfoedafológicas	Área (km ²)	Área (%)
1 Altiplanicie con Regosol y Litosol	1	0.0
2 Conos lávicos con Feoem y Regosol	139	0.8
3 Conos volcánicos y derrames lávicos ligera a moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con Andosol, Luvisol y Regosol	1.304	7.7
4 Depresión intervolcánica con depósitos finos de flujos piroclásticos con Vertisol	209	1.2
5 Derrames lávicos con Regosol y Litosol	136	0.8
6 Derrame lávico suavemente inclinado con cobertura de piroclastos con Luvisol, Andosol y Acrisol	253	1.5
7 Derrames basálticos cubiertos por piroclastos con Luvisol y Andosol	453	2.7
8 Derrames basálticos y andesíticos cubiertos por piroclastos con Andosol y Regosol	858	5.1
9 Derrames basálticos y volcanes escudo cubiertos por piroclastos con Feozem, Vertisol y Regosol	132	0.8
10 Derrames lávicos moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con Luvisol, Acrisol y Cambisol	592	3.5
11 Derrames lávicos muy suavemente inclinados con cobertura de piroclastos con Vertisol y Regosol	437	2.6
12 Derrames lávicos semicubiertos por piroclastos con Feozem, Vertisol y Andosol	568	3.4
13 Derrames lávicos suave a moderadamente inclinados con Luvisol, Acrisol y Litosol	308	1.8
14 Derrames lávicos suave a moderadamente inclinados cubiertos por piroclastos con Andosol, Feozem y Luvisol	923	5.5
15 Laderas basálticas y andesíticas con Litosol y Regosol	86	0.5
16 Laderas graníticas y volcánicas con Regosol, Feozem y Cambisol	1.653	9.8



CUADRO 9. CONTINÚA

Unidades morfoedafológicas	Área (km ²)	Área (%)
17 Laderas metamórficas con Acrisol, Luvisol y Regosol	423	2.5
18 Laderas sedimentarias con Regosol, Feozem y Litosol	547	3.3
19 Laderas sedimentarias cubiertas por piroclastos con Luvisol, Acrisol y Regosol	316	1.9
20 Laderas sedimentarias erosionadas Litosol y Regosol	266	1.6
21 Laderas sedimentarias muy inclinadas con Feozem, Cambisol y Regosol	880	5.2
22 Laderas volcánicas con Regosol, Feozem y Cambisol	357	2.1
23 Laderas volcánicas muy inclinadas con Regosol y Litosol	211	1.3
24 Montañas andesíticas con intrusiones graníticas y dioríticas, cubiertas por flujos piroclásticos terciarios con Cambisol, Luvisol y Regosol	884	5.2
25 Montañas graníticas y dioríticas cubiertas por flujos piroclásticos moderadamente disectadas con Cambisol y Luvisol	233	1.4
26 Montañas graníticas y dioríticas cubiertas por flujos piroclásticos muy disectadas con Cambisol, Feozem y Regosol		532
27 Piedemonte de depósitos fluviales y fluvio-lacustres con Vertisol	551	3.3
28 Piedemonte de flujos piroclastos con Vertisol y Feozem 1.283	7.6	
29 Piedemonte inferior con depósitos fluviales con Vertisol, Feozem y Regosol	605	3.6
30 Piedemonte volcánico muy disecado con Feozem y Vertisol	83	0.5
31 Piedemonte volcánico superior con Cambisol y Regosol	39	0.2



CUADRO 9. CONTINÚA

Unidades morfoedafológicas	Área (km ²)	Área (%)
32 Planicie fluviolacustre con Vertisol y Gleysol	143	0.9
33 Superficie de piedemonte ligeramente inclinado con Feozem y Vertisol	73	0.4
34 Superficies volcánicas semicubiertas por piroclásticos suelos Luvisol, Andosol y Regosol	156	0.9
35 Valles acumulativos y terrazas fluviales con Feozem y Vertisol	652	3.9
36 Volcán y derrame lávico cubiertos por flujos piroclásticos con Andosol	150	0.9
37 Volcán semiescudo cubierto por piroclastos terciarios con Luvisol, Andosol y Regosol	375	2.2
38 Volcán semiescudo y piedemonte superior cubiertos por piroclastos con Cambisol y Regosol	42	0.3

La cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo

LOS CAMBIOS EN EL PERIODO 1976-2003

Los cambios de uso del suelo en los últimos 27 años se estimaron contrastando la superficie de la cubierta vegetal de los mapas correspondientes al 2003 (1:250,000), con la cartografía de la serie I de uso de suelo y vegetación (1:250,000) del INEGI en 1976. En la figura 5 se presenta el modelo utilizado para determinar las coberturas y los procesos de cambio. Estos procesos fueron identificados y representados en el mapa de procesos de cambio de acuerdo a un modelo que permite distinguir la alteración de las coberturas primarias.

La cartografía de 1976 (versión digital de INEGI y corregida a partir de verificación de campo) mostró que las coberturas predominantes fueron: selva baja caducifolia y subcaducifolia (37 %), bosque de pino-encino (incluye encino-pino) (17 %), agricultura de temporal (15 %) y agricultura de riego (incluye riego eventual 11 %). Para el año 2003 las mismas coberturas vegetales cambian en proporción: selva baja caducifolia y subcaducifolia (30 %), bosque de pino-enci-

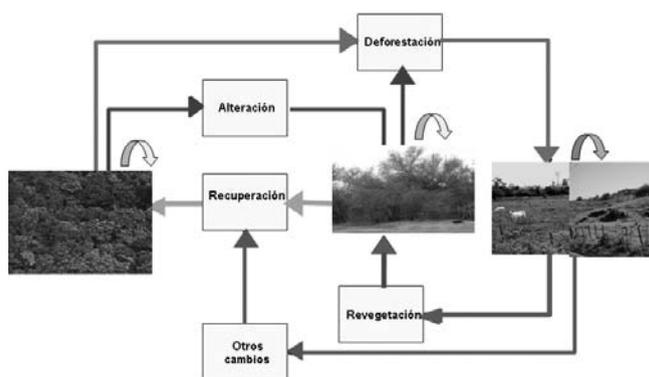




no (incluye encino-pino) (16 %), agricultura de temporal (26 %) y agricultura de riego (incluye riego eventual) (13 %).

Al comparar ambas fechas se aprecia un incremento sustancial de la superficie ocupada por la actividad agrícola de temporal, seguido por el incremento de las áreas cubiertas por pastos. Por otro lado, se aprecia que las selvas bajas caducifolias primarias y los bosques primarios de coníferas y latifoliadas también redujeron sus superficies en los últimos 27 años.

FIGURA 5. MODELO DE PROCESOS DE CAMBIO DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC



Los resultados del ACCUS arrojan valores en superficie y porcentuales de las coberturas y usos entre una fecha y otra. Los datos nos muestran las tendencias expresadas en estadísticas que además son espacialmente explícitos. A grandes rasgos cabe destacar que la tendencia ha sido hacia una disminución de las coberturas naturales y un incremento de las coberturas antrópicas. Existe una tendencia de conversión de bosques y selvas a su reducción en superficie, tal como se muestra en la figura 6 (mapa de procesos de cambio). Los resultados del ACCUS se despliegan en matrices de transición que describen las superficies ocupadas por los tres grupos de coberturas (cuadro 10).

Las coberturas nativas aún predominan pero se están alterando, y actualmente una alta proporción se encuentra en estadios secundarios. Por otra parte los usos del suelo relacionados con las actividades antrópicas en general han tendido a un incremento; aunque cabe notar que se ha registrado una disminución de la





agricultura de temporal con cultivos anuales (maíz y frijol) y un incremento de la agricultura de temporal con cultivos perennes (aguacate y durazno). Estos cambios se aprecian mejor en la matriz que describe los datos porcentuales (cuadro 11). El modelo de procesos de cambio (cambio de coberturas predominantemente primarias a secundarias), da idea de las variaciones que experimentan las coberturas oriundas en la región de la cuenca del río Tepalcatepec y su tendencia se describe mejor a partir de las tasas de cambio calculadas. Las tasas de los principales tipos de bosques en su condición primaria y secundaria. De este análisis se observó que los palmares, sabanas, selvas y bosques primarios son las coberturas que se reducen a tasas mayores, mientras lo contrario se observa con las selvas y bosques secundarios y las coberturas antropogénicas son las que han ganado mayores superficies (figura 7).

CUADRO 10. SUPERFICIES DE CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL (HA)

	2003				
	1976	Cobertura	Cobertura	Cobertura	Total
	primaria	secundaria	antrópica		
Cobertura primaria	4,680	2,696	1,568	8,943	
Cobertura secundaria	625	1,300	851	2,776	
Cobertura antrópica	359	484	4,235	5,078	
Total	5,663	4,480	6,654	16,797	

La evaluación de tierras

El propósito de esta sección es presentar parte de los resultados de una evaluación física cualitativa de las clases principales de uso de la tierra de la cuenca del río Tepalcatepec. Tiene un carácter general dada la extensión del área de estudio y de la escala de trabajo, así como de la representación cartográfica. El resultado del análisis ofrece una estimación del grado de aptitud de las unidades de tierra para los tipos de uso seleccionados como relevantes en la región, tomando en





CUADRO 11. SUPERFICIES DE CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL EN PORCENTAJE

	2003			
	1976	Cobertura secundaria	Cobertura antrópica	Cobertura
Cobertura primaria	28	16	9	
Cobertura secundaria	4	8	5	
Cobertura antrópica	2	3	25	

cuenta principalmente sus atributos naturales, dentro de un contexto socioeconómico particular. La evaluación parte del reconocimiento de que diferentes tipos de uso de la tierra (TUT) tienen diferentes requerimientos biológicos, de manejo tecnológico y/o de conservación de los recursos. Por lo tanto, la aptitud de la tierra se evalúa y clasifica con respecto a clases específicas de uso. Los distintos tipos de utilización de la tierra determinan un conjunto de requisitos de uso de la tierra (RUT), los cuales se definen como las condiciones necesarias para que el TUT tenga una práctica exitosa y sustentable (FAO 1976). El concepto tierra se refiere al *conjunto de condiciones ambientales presentes en una porción del terreno que influyen sobre el uso y su producción*, incluyendo entre otras al clima, el relieve, la geología, la vegetación y las características hidrológicas, además del suelo mismo.

Contexto regional y tipos de uso de la tierra seleccionados

El sector primario juega un papel fundamental en la actividad económica de la población. Existen formas variadas de utilización de los recursos, desde algunas con grandes requerimientos de mano de obra, hasta las que muestran alto grado de mecanización. Se presentan fenómenos de cambio tecnológico que están relacionados con procesos sociales (que al parecer tienden a intensificarse) como la migración y sus efectos sobre la demografía, las actividades económicas y el mercado de trabajo. Actualmente se han modificado, frenado o revertido, importantes tendencias históricas en el uso del suelo que ocurrían anteriormente, como la expansión de la frontera agrícola, que implicaba la creciente apertura al





cultivo de tierras cada vez más marginales, principalmente para la ganadería o la producción de cultivos anuales. Esto ha traído efectos tales como el abandono de parcelas, especialmente las que cuentan con condiciones más limitantes, la “matorralización”, la escasez o incremento en los costos de mano de obra, la mecanización y el aumento en el uso de insumos agroindustriales, el cambio de cultivos, etc.

Basados en los usos del suelo predominantes en la cuenca, en la cartografía y los datos disponibles a partir del diagnóstico biofísico del territorio, se decidió evaluar los siguientes tipos de utilización de la tierra (TUT):

- Agricultura de temporal (maíz bajo cultivo anual)
- Agricultura con cultivos perennes (frutales arbóreos)
- Ganadería bovina extensiva (pastizales, agostaderos)
- Uso forestal (maderable, doméstico)
- Conservación de bienes y servicios ambientales
- Tierras potencialmente regables por gravedad, de acuerdo con su topografía.

Los usos seleccionados están definidos en forma muy general, de manera que corresponden a clases principales de uso (las principales divisiones del uso rural). Sólo se especifica al maíz como única especie de cultivo, dada su importancia.

Método

Como modelo de evaluación se utilizó la metodología del proyecto de Zonas Agroecológicas de la FAO (1978) y su adaptación para México, el *Manual de la metodología para evaluar la aptitud de las tierras para la producción de cultivos básicos en condiciones de temporal*, del Colegio de Postgraduados (1991). Este modelo sirvió para evaluar el uso agrícola de temporal; para el resto de los tipos de uso se modificaron los criterios empleados y los niveles de calificación, como se muestra más adelante.

Esta metodología considera los requerimientos climáticos de un cultivo y calcula el rendimiento potencial que tendría en determinados climas que cumplieran





sus necesidades de desarrollo biológico sin ninguna otra limitación. Con este valor máximo como referencia, estima la proporción en que disminuirían los rendimientos si se cultivara en un suelo con diferentes limitantes. Las áreas que cumplan todos los requisitos de uso son las más aptas. En términos operativos, involucra realizar en una primera etapa un inventario climático para definir la longitud de los períodos de crecimiento del maíz (el tiempo durante el año en que se presentan condiciones de temperatura y humedad favorables para su crecimiento) y su distribución geográfica. Al periodo más favorable se le asigna un valor de 3, al intermedio 2 y al menos favorable 1; las áreas que no cumplen los requerimientos mínimos se califican como no aptas (0). El resultado de esta etapa es una clasificación agroclimática.

En una segunda etapa, sobre la base de un inventario edáfico, se analizan por separado cada una de las variables siguientes: unidad de suelo predominante, las distintas fases de suelo, la textura y la pendiente. Las variables que implican una condición favorable se etiquetan como S1; las que representan una limitante moderada se etiquetan como S2 y aquellas que corresponden a una limitante muy severa, como no aptas (NA).

Los pasos siguientes consisten en sobreposiciones sucesivas de mapas y la calificación de las áreas de intersección:

- el mapa de clasificación agroclimática previa se cruza con la carta de unidades de suelo. Si un área no presenta limitaciones por el tipo de unidad de suelo (S1), se conserva su clasificación agroclimática; si presenta una limitante moderada (S2) se degrada en una clase y si presenta la etiqueta NA, cualquier clase agroclimática se convierte en no apta
- el mapa resultante del proceso anterior se cruza con el de fases del suelo y se califica con la misma lógica
- se cruzan subsecuentemente los mapas resultantes con la textura y la pendiente.

El resultado final corresponde a la clasificación agroecológica de la aptitud, que se divide en tres niveles: muy apta (MA), apta (A) y marginalmente apta (mA). A continuación se señalan los criterios utilizados para la evaluación de cada uso.





AGRICULTURA DE TEMPORAL (MAÍZ BAJO CULTIVO ANUAL)

Se refiere a maíz en unicultivo (no asociado con otros) bajo el sistema anual (sin considerar el descanso por varios años, como ocurre en sistemas de roza-tumba-quema). Si bien se evaluaron separadamente dos niveles de inversión (alto nivel de insumos: con tracción mecánica, con uso de fertilizante; bajo nivel: con herramientas manuales, bajo o nulo uso de fertilizante, etc.), ambos se presentaron en forma conjunta. El maíz como cultivo anual en hileras, que requiere cierta remoción del terreno, no cubre rápidamente la superficie con su follaje; esto puede exponer el suelo a elevados riesgos de erosión hídrica, especialmente en altas pendientes. En este uso no es generalizada la aplicación de medidas físicas mayores (y caras) de conservación de suelos (FAO 1985a). Considerando la actual tendencia hacia el abandono de tierras con condiciones más limitantes, se decidió utilizar un criterio conservador en cuanto a la pendiente para calificar a las tierras aptas para este uso. Los criterios de evaluación de la agricultura de temporal se presentan en los cuadros 12, 13, 14, 15 y 16.

CUADRO 12. CALIFICACIÓN AGROCLIMÁTICA

División climática	Periodo de crecimiento	Calificación	Código
Tropical caliente	< 90	NA	0
	90-119	mA	1
	120-150	A	2
	150-240	MA	3
	240-270	A	2
Tropical templada	< 120	NA	0
	120-150	mA	1
	150-210	A	2
	210-270	MA	3





CUADRO 13. CALIFICACIÓN POR SUELO DOMINANTE

Clave de suelo	Unidad de suelo dominante	Etiqueta	Código
Ao, Ah	Acrisol órtico y húmico	S2	2
To, Th, Tm	Andosol ócrico, húmico y mólico	S1	1
Tv	Andosol vítrico	NA	0
Bc, Bd, Be	Cambisol crómico, dístrico y éútrico	S1	1
Kk, Kh	Castañozem cálcico y háplico	S1	1
Hc, Hh, Hl	Feozem calcárico, háplico y lúvico	S1	1
Je	Fluvisol éútrico	S1	1
Gv	Gleysol vértico	NA	0
I	Litosol	N2	0
Lc, Lv	Luvisol crómico y vértico	S1	1
Rc, Rd, Re	Regosol calcárico, dístrico y éútrico	S2	1
E	Rendzina	NA	0
Vc, Vp	Vertisol crómico y pélico	S1	1
Xk	Xerosol cálcico	S2	2

CUADRO 14. MODIFICACIÓN POR FASES DEL SUELO

Fases del suelo	Etiqueta	Código
Pedregosa	S2	2
Lítica	S2	2
Petrocálcica	S2	2
Salina	S1	1
Fuertemente salina	NA	0
Sódica y fuertemente sódica	NA	0
Lítica	S1	1
Lítica profunda	S1	1

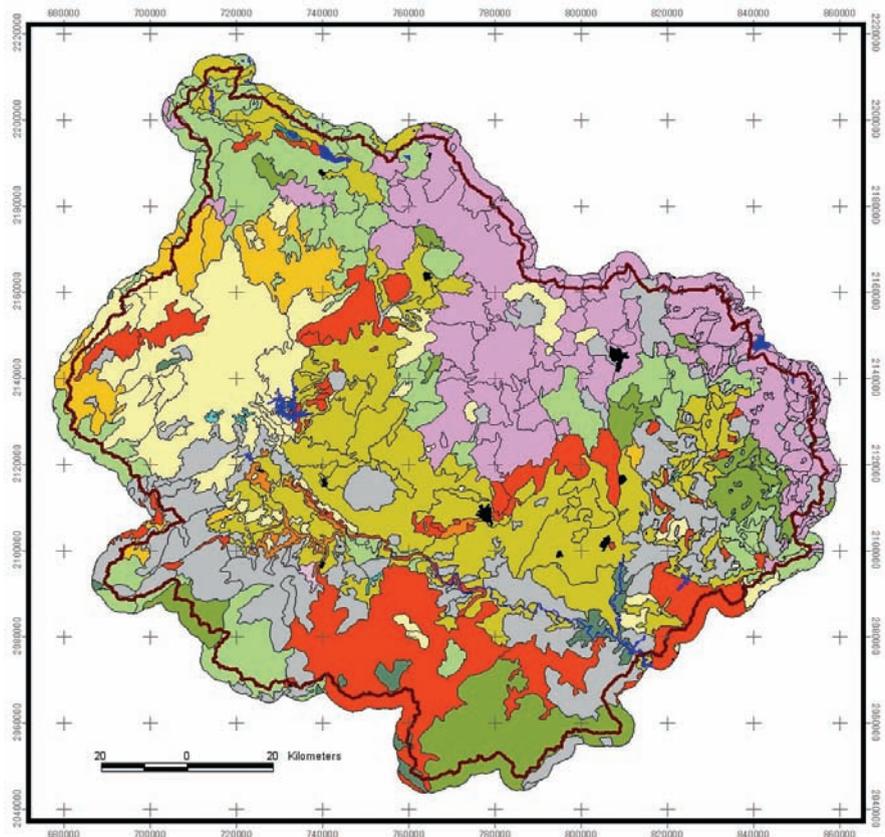
CUADRO 15. MODIFICACIÓN POR TEXTURA DEL SUELO

Textura	Etiqueta	Código
Gruesa	S2	2
Media	S1	1
Fina	S1	1





FIGURA 3. MAPA GENERALIZADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS EN LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC



Fuente:
INEGI

- Suelos principales
- | | | |
|------------|-------------|--------------------------------|
| Acrisol | Litosol | Cuerpo de agua |
| Andosol | Luvisol | Limite Cuenca Río Tepalcatepec |
| Cambisol | Regosol | |
| Castañozem | Rendzina | |
| Feozem | Vertisol | |
| Fluvisol | Xerosol | |
| Gleysol | Zona Urbana | |



FIGURA 8. MAPA DE APTITUD PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

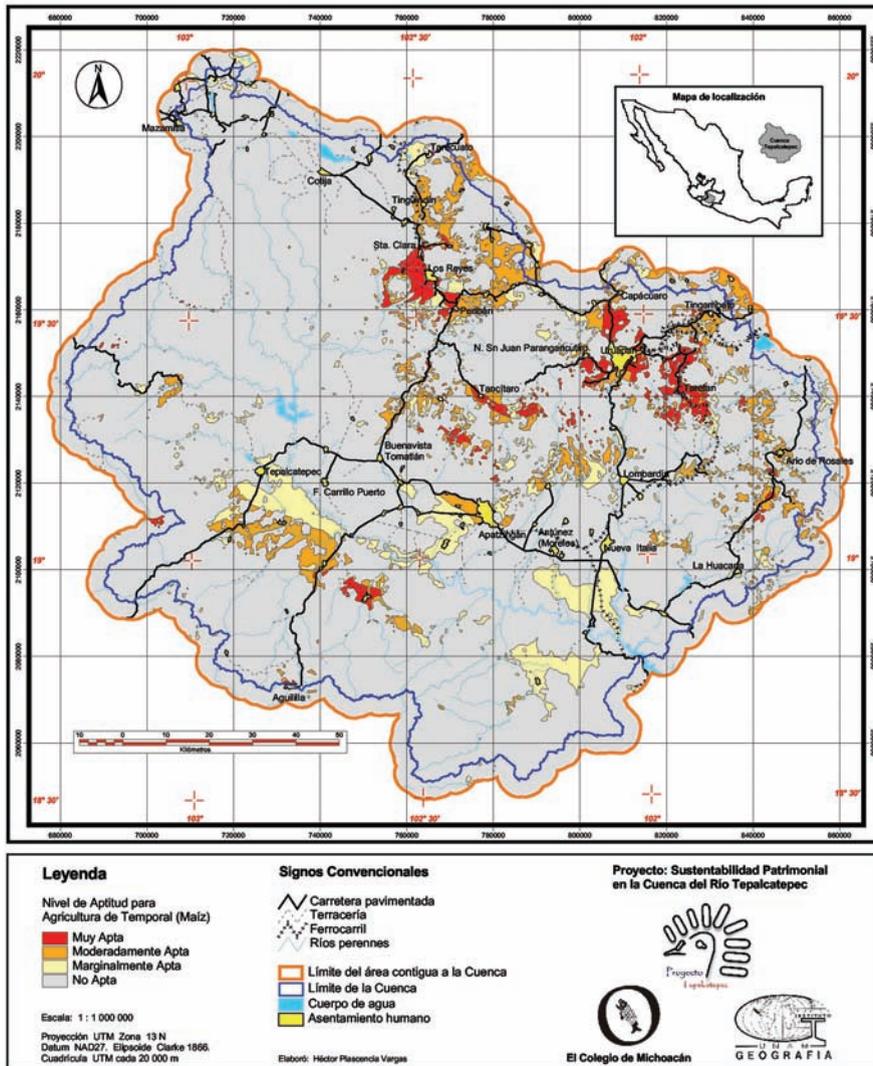


FIGURA 9. MAPA DE APTITUD PARA AGRICULTURA DE RIEGO DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

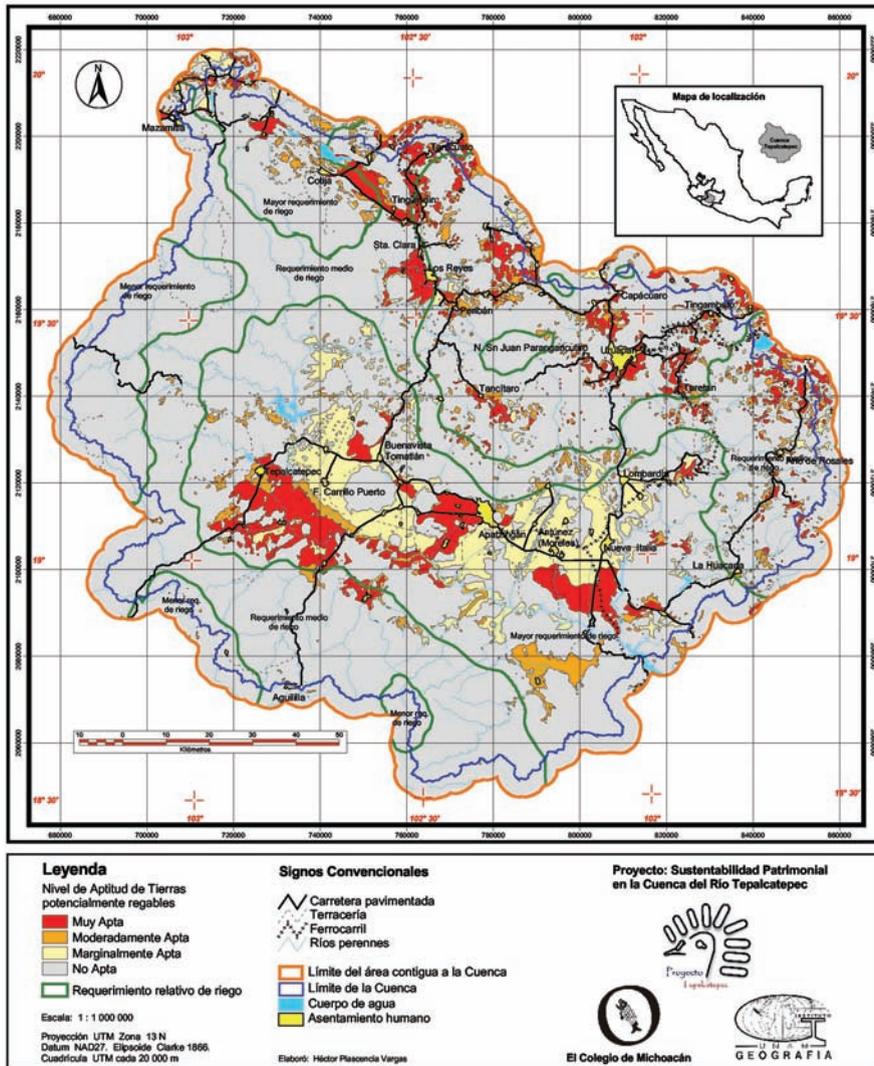


FIGURA 10. MAPA DE APTITUD PARA AGRICULTURA CON CULTIVOS PERENNES DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

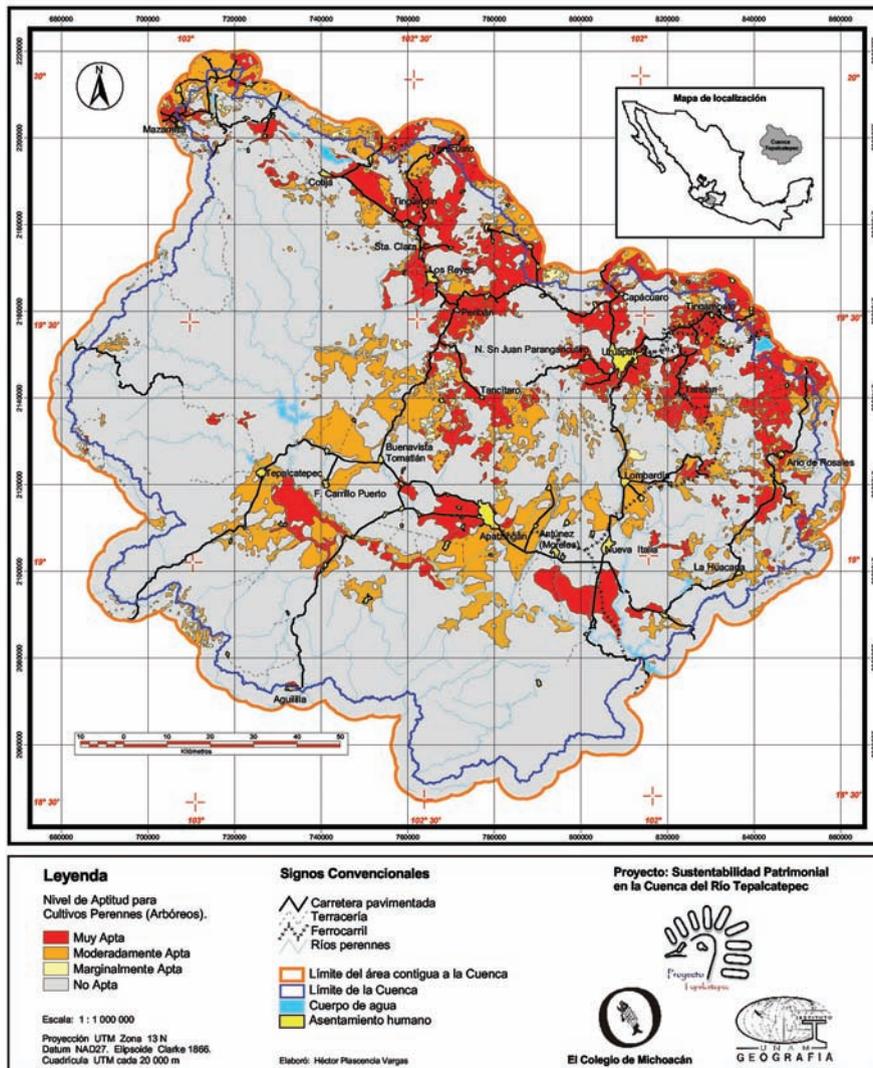


FIGURA 11. MAPA DE APTITUD PARA GANADERÍA BOVINA EXTENSIVA DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

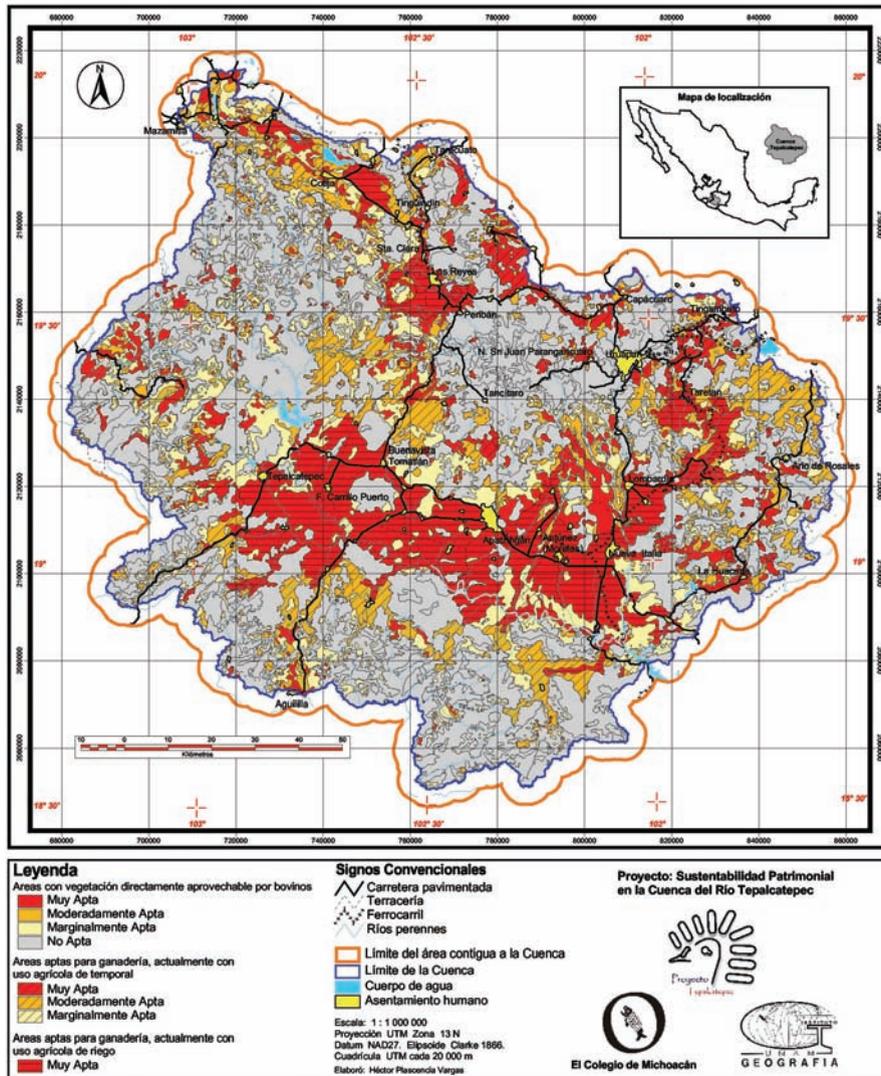


FIGURA 12. MAPA DE APTITUD PARA USO FORESTAL DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

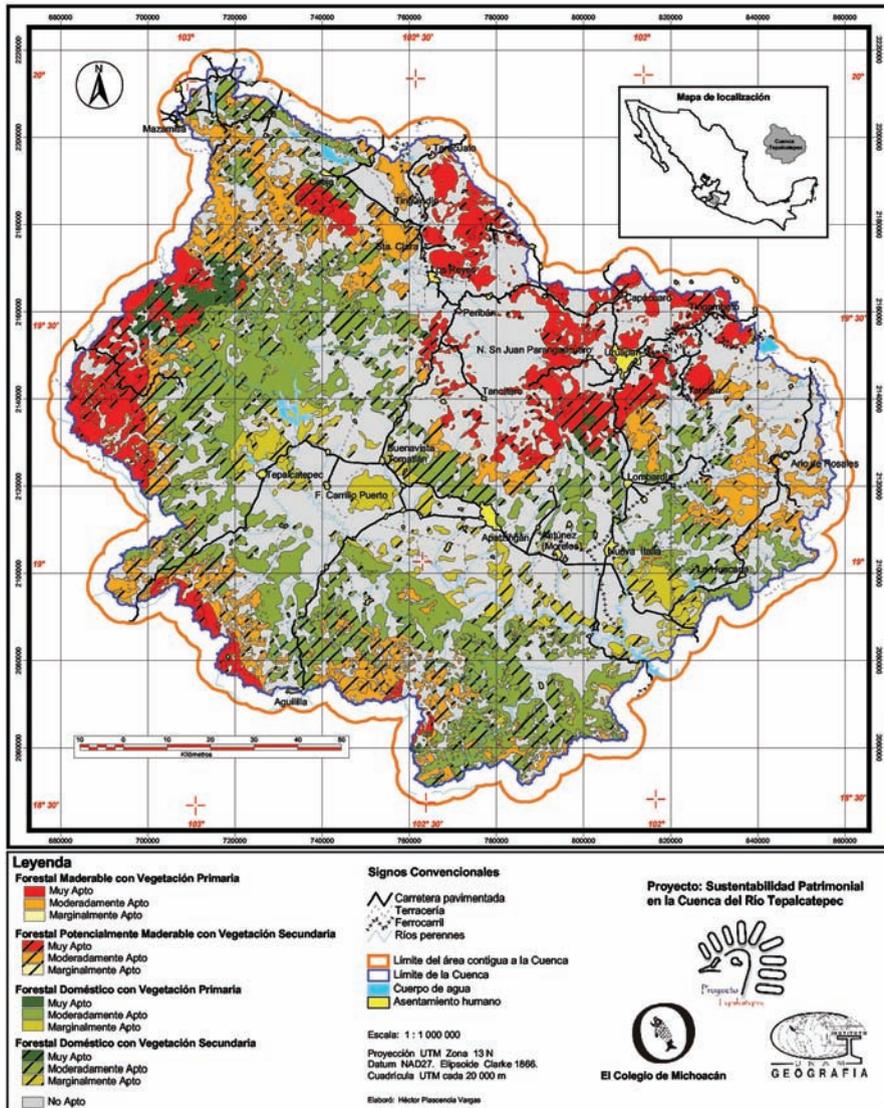


FIGURA 13. MAPA PARA CONSERVACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

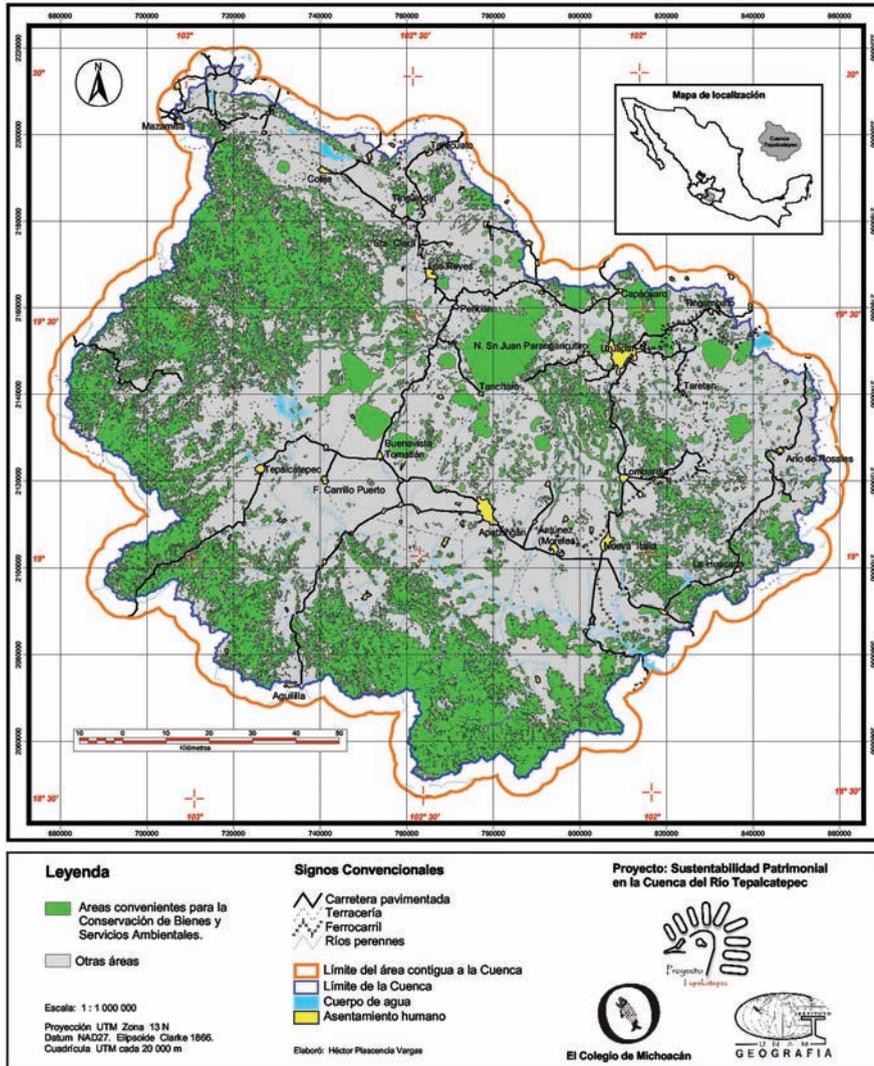


FIGURA 14. MAPA DE ÁREAS CRÍTICAS PARA LA CONSERVACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES DE LA CUENCA DEL RÍO TEPALCATEPEC

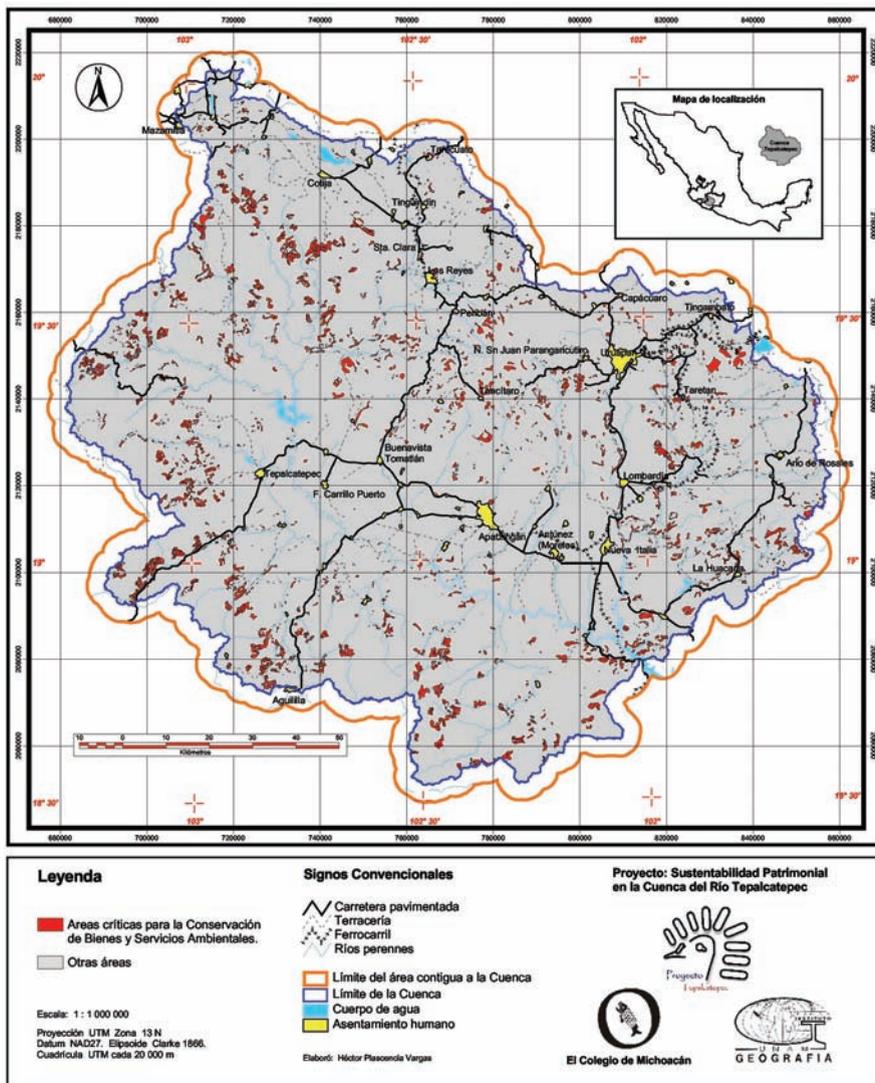




FIGURA 21. MAPAS DE APTITUD POR SECTOR OBTENIDOS A PARTIR DE ANÁLISIS MULTICRITERIO (A, B) Y EVALUACIÓN DE TIERRAS (C, D, E, F Y G) PARA LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

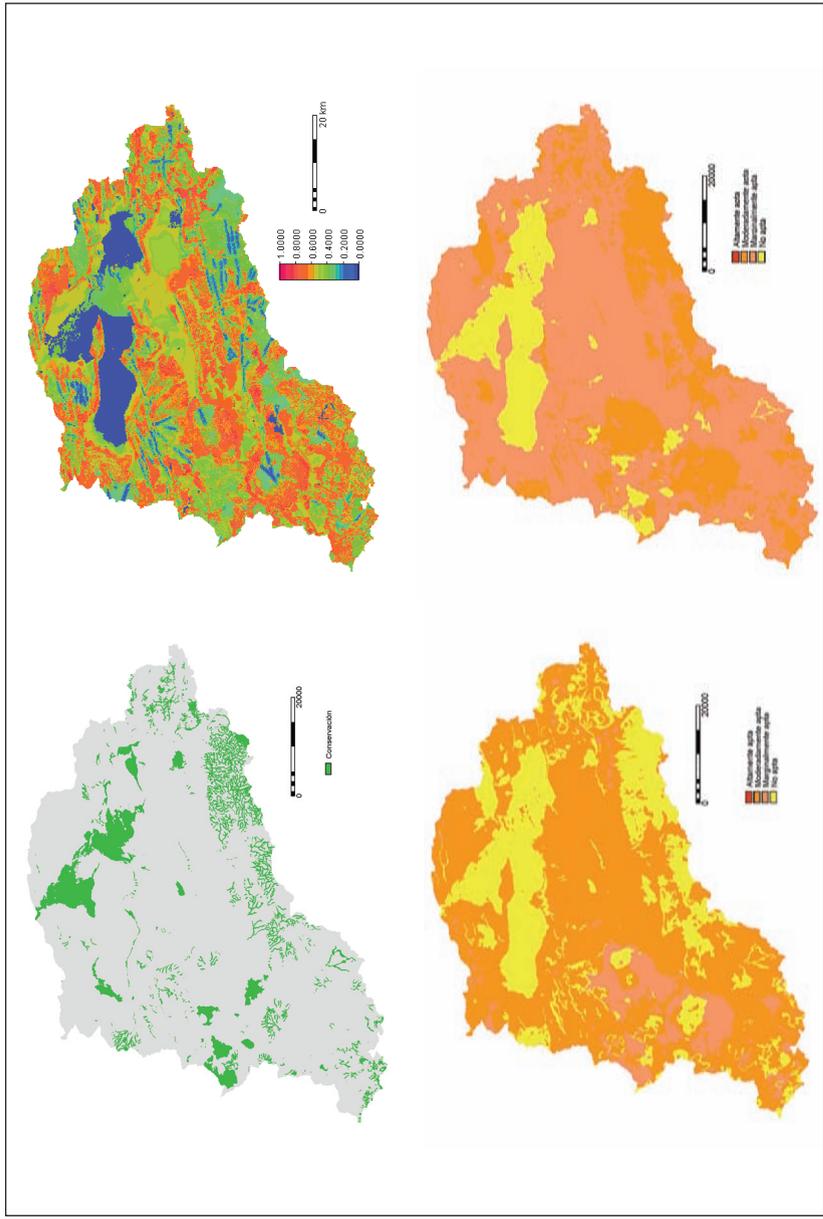




FIGURA 21. CONTINÚA

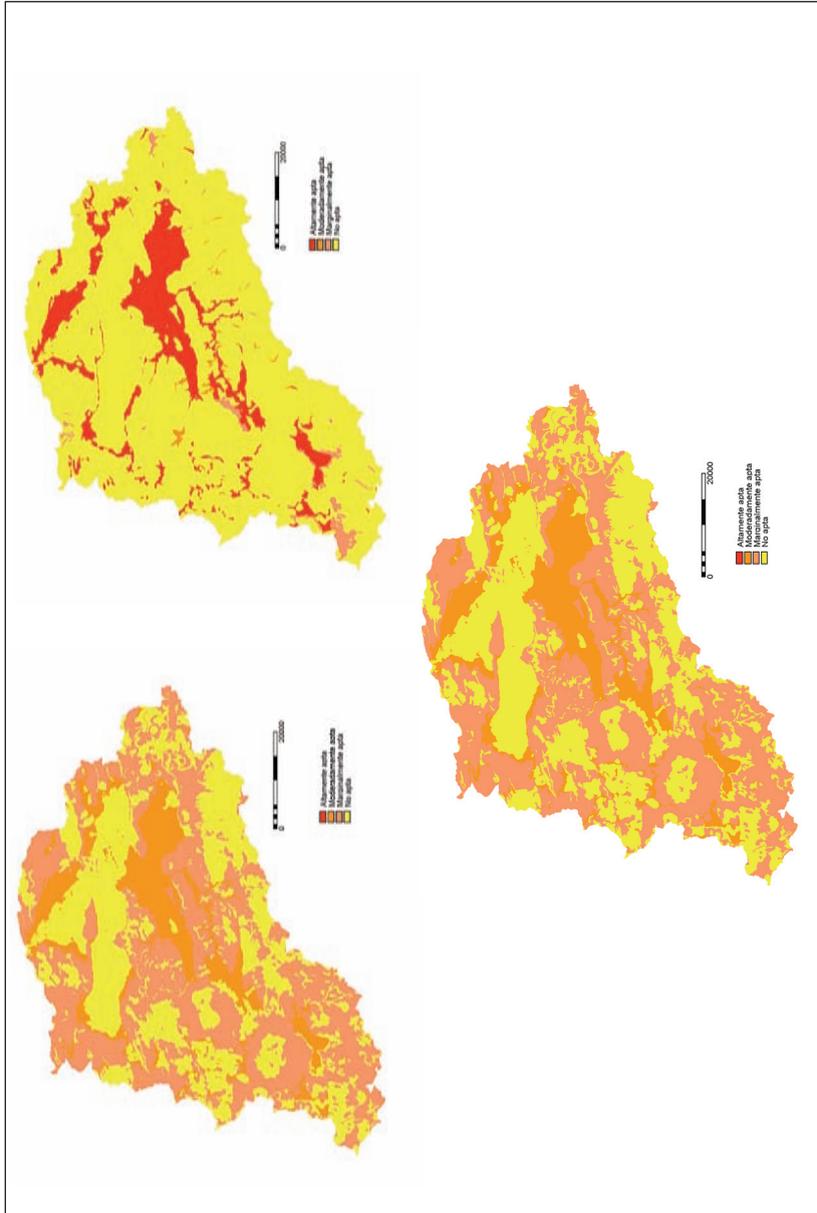




FIGURA 23. GRUPOS DE APTITUD PARA LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

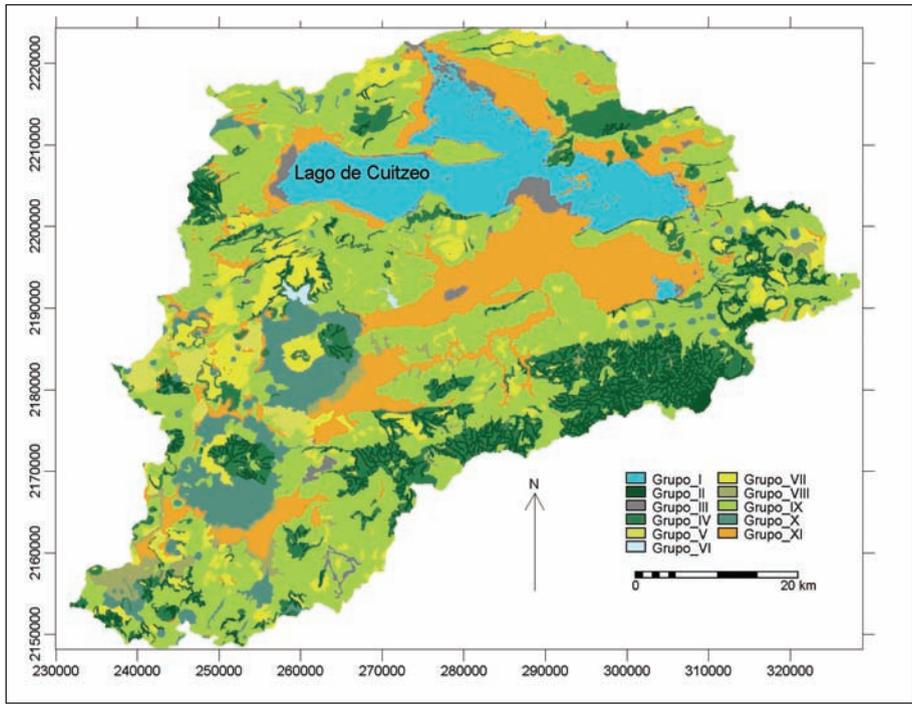




FIGURA 25. MAPA DE CONFLICTO DE USO DEL SUELO

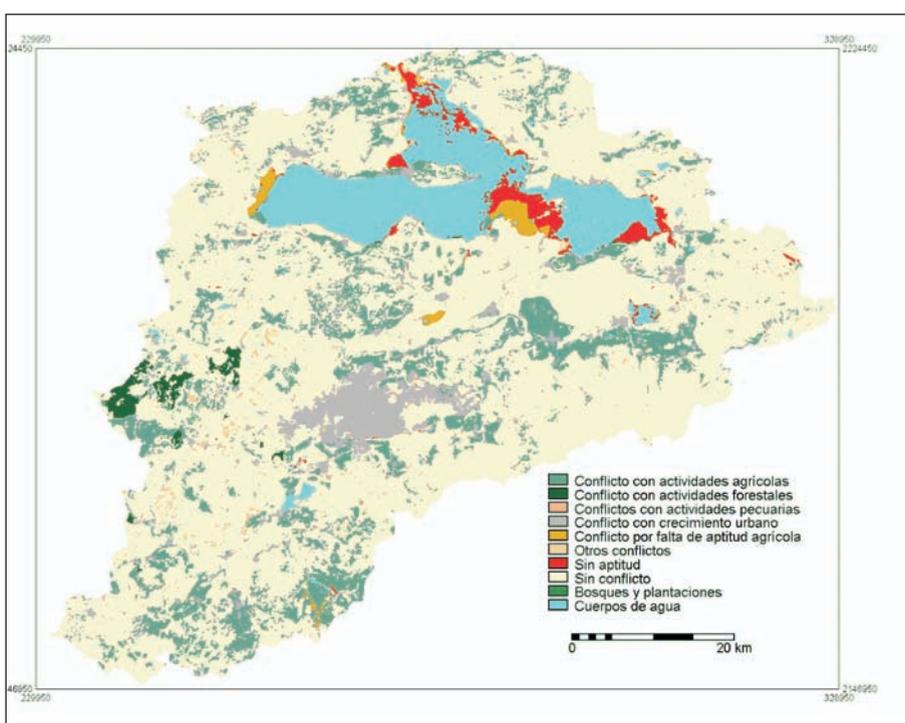
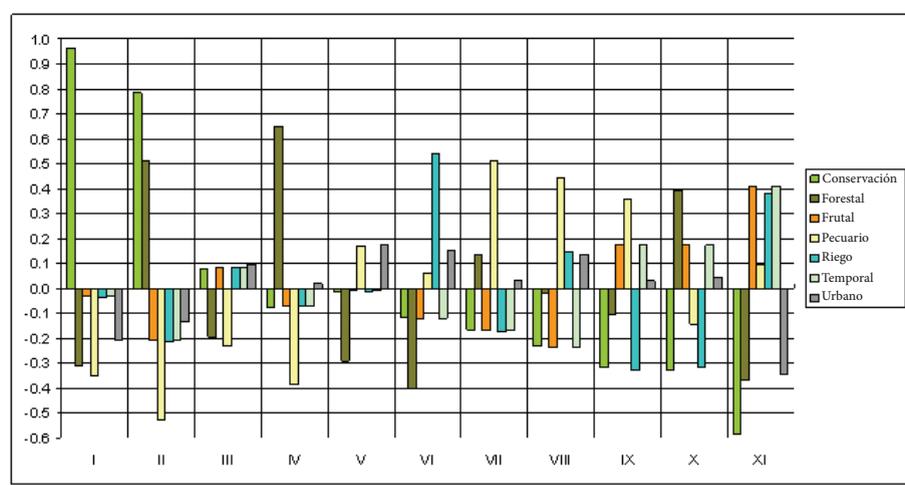


FIGURA 26. RESIDUALES DE GOWER PARA LOS GRUPOS DE APTITUD DE LA CUENCA DE CUITZEO





CUADRO 16. MODIFICACIÓN POR PENDIENTE

Pendiente (%)	Bajo	Alto
0-10	1	1
10-18	1	2
> 18	NA	NA

Nota:

S1 = 1 No tiene limitaciones. Se conserva la clasificación agroclimática

S2 = 2 Alguna limitación. Se degrada una clase

NA = 0 No es apto. Cualquier clase agroclimática se convierte en NO APTA

AGRICULTURA DE RIEGO (TIERRAS POTENCIALMENTE IRRIGABLES POR GRAVEDAD)

Se trata de una evaluación difícil que requeriría disponer de datos suficientes acerca de la cantidad de agua superficial y subterránea, así como estudios detallados de suelos y una cuantificación de los costos que involucraría desarrollar un sistema de riego, y compararlo con los beneficios que se podrían esperar, lo cual está fuera del alcance del presente estudio, pero se consideró conveniente señalar al menos cuáles serían las tierras potencialmente irrigables de acuerdo con la topografía (para riego por gravedad) suponiendo que existiera una fuente adecuada de agua. De hecho, muchos agricultores realizan esto en pequeñas áreas. Se escogió el riego por gravedad debido a que es el más barato y frecuente.

Como una forma de aproximarse a conocer las áreas así definidas, se empleó un procedimiento similar al de la evaluación para el uso agrícola de temporal, con algunos cambios (FAO 1985b). Primero se eliminó la condición climática fría, es decir, aquellas zonas con menos de 10° C de temperatura media anual, en altitudes mayores a los 3 000 msnm, con alto riesgo de heladas. Se partió del supuesto que todas las tierras tuvieran un período de crecimiento óptimo (es decir, sin restricciones por humedad) y se les asignó el valor de 3 (muy apto). Posteriormente, se siguió la misma secuencia que en la evaluación para el uso agrícola de temporal, exceptuando un cambio en los valores en cuanto al criterio de pendiente (véase cuadro 17). En el mapa final se añadió, como referencia, la distribución geográfica de las zonas con diferente "nivel relativo de requerimiento de riego", lo que en realidad representa el





inverso del “nivel relativo de disponibilidad de agua debido al clima”, como se utilizó en los otros tipos de uso.

AGRICULTURA CON CULTIVOS PERENNES (FRUTALES ARBÓREOS)

Los cultivos perennes pueden tener requerimientos muy variados según la especie. Dado el carácter general de su definición, para este tipo de uso no se realizó una evaluación climática particular; no obstante, se incluyó en el mapa final la distribución geográfica del nivel relativo de disponibilidad de agua debido al clima, que sirve como orientación acerca de las áreas que pueden ser favorables a una especie. Los frutales arbóreos tienen en común la necesidad de suelos más profundos que los cultivos anuales; además, necesitan de buen drenaje. Por su calidad de perennes y la menor remoción del suelo representan menor peligro de erosión, por lo que pueden cultivarse en pendientes mayores (cuadro 18).

CUADRO 17. CRITERIOS USADOS PARA LA CALIFICACIÓN DE LA PENDIENTE PARA ÁREAS IRRIGABLES

% Pendiente	Etiqueta
0-6	S1
6-10	S2
> 10	NA

CUADRO 18. CRITERIOS USADOS PARA LA CALIFICACIÓN DE LA PENDIENTE PARA LAS ÁREAS DE CULTIVOS PERENNES

% Pendiente	Etiqueta	Código
0-15	MA	3
15-25	A	2
25-40	mA	1
> 40	NA	0

Se consideraron suelos utilizables a aquéllos que por sus características tienden a ser de mayor profundidad y se les calificó con el nivel más alto (3), excepto





los cambisoles (2). Se eliminaron los suelos que son muy someros o tienden a ser poco profundos (litosoles, rendzinas, regosoles, xerosoles o suelos con problemas de drenaje como gleysoles; es decir, se calificaron como no aptos). Las fases lítica, petrocálcica, fuertemente salina y sódica se consideraron no aptas. Por último, se reclasificaron con un menor nivel de aptitud las unidades de suelo con fases gravosa, pedregosa y lítica profunda (S2).

GANADERÍA BOVINA EXTENSIVA (PASTIZALES, AGOSTADEROS)

Este tipo de uso se refiere sólo a la ganadería bovina, enfatizando en la de tipo extensivo; en ella es importante la alimentación de los animales en libertad tanto en pastizales como en la vegetación secundaria (agostaderos). Se consideró el nivel relativo de disponibilidad de agua debido al clima, por su efecto sobre el crecimiento vegetal y por tanto su disponibilidad para la alimentación. En el criterio de pendiente se estableció un valor máximo de 40% (por su efecto sobre el riesgo de erosión y la movilidad del ganado). Debido a la importancia del agua para el ganado, que se acentúa en condiciones de alta temperatura, se incluyó el criterio de distancia a cuerpos de agua o corrientes perennes. En la evaluación se incluyeron las áreas que están actualmente bajo uso agrícola y se eliminaron las áreas protegidas o con vegetación primaria (cuadro 19).

CUADRO 19. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL USO PECUARIO

Tipo de vegetación	Disponibilidad de humedad debida al clima	Pendiente (%)	Distancia al agua (km)	Aptitud
Pastizales diversos	Alta	0-40	< 5	Alta
	Media	< 20	< 5	Alta
	Media	> 20	< 5	Media
	Baja	< 20	< 1	Media
	Baja	< 20	> 1	Baja
	Baja	> 20	< 5	Baja
Vegetación secundaria	Alta	< 20	< 5	Media





CUADRO 19. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL USO PECUARIO

Tipo de vegetación	Disponibilidad de humedad debida al clima	Pendiente (%)	Distancia al agua (km)	Aptitud
Vegetación secundaria	Alta	> 20	< 5	Baja
	Media	< 20	< 1	Media
	Media	< 20	> 1	Baja
	Media	> 20	< 5	Baja
	Baja	0-40	< 5	Baja
			> 40	NA

USO FORESTAL (MADERABLE, DOMÉSTICO)

En la evaluación del uso forestal se consideraron los tipos de vegetación de bosques y selvas, con vegetación primaria y secundaria. El principal factor de evaluación consiste en la presencia de vegetación utilizable de tipo arbórea, la que tiene fines productivos, por lo tanto los usos no maderables no fueron evaluados a esta escala. Si bien se calcularon las áreas con vegetación secundaria, se consideran aparte, en función de su potencial futuro. Se incluyó el criterio del nivel relativo de disponibilidad de agua debido al clima (cuadro 20), que influye sobre la tasa de crecimiento de los árboles. Se tuvo en cuenta la pendiente, dada su influencia sobre la erosión y la facilidad de extracción y transporte. Aun reconociendo su importancia, en este estudio general no se tomaron en cuenta factores de suelo, al no considerarlos determinantes para el crecimiento de árboles. Se eliminaron las áreas naturales protegidas federales y estatales. Los bosques templados se calificaron como susceptibles de producción maderable comercial y las selvas se catalogaron como forestal de uso doméstico.

CONSERVACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES

Para la identificación de las áreas aptas para la conservación de bienes y servicios ambientales se consideraron:





CUADRO 20. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL USO FORESTAL

Tipo de vegetación	Disponibilidad de humedad debida al clima	Pendiente (%)	Aptitud
Bosques y selvas	Alta	0-50	Alta
	Alta	> 50	Media
	Media	0-50	Media
	Media	50-70	Baja
	Baja	0-70	Baja

- Las áreas naturales protegidas federales y estatales ya decretadas
- Las áreas con geformas correspondientes a conos de piroclastos, conos de piroclastos y lavas, y los derrames de lava, por sus suelos de muy escaso desarrollo y porque corresponden a áreas de gran importancia hidrológica en la región, dada su alta capacidad de infiltración, con la consecuente recarga de acuíferos
- Las áreas con pendientes mayores a 50%, que coinciden, en buena medida, con las zonas de cabecera de las corrientes fluviales y con porciones de vegetación mejor conservadas, debido a su menor accesibilidad.

Análisis de resultados de la evaluación de tierras

Aquí se presentan de manera general los principales resultados de la evaluación para cada tipo de uso, con un cuadro resumen del nivel de aptitud, superficie y porcentaje del total de la cuenca. La descripción distribución espacial de la aptitud de las tierras para se presenta a continuación.

AGRICULTURA DE TEMPORAL (MAÍZ BAJO CULTIVO ANUAL)

De acuerdo con el análisis realizado, 14.3% de superficie tiene algún grado de aptitud para el uso agrícola de maíz de temporal (figura 8 a color, página 82, y cuadro 21). Las principales razones son:





CUADRO 21. CLASIFICACIÓN DE APTITUD PARA EL USO AGRÍCOLA DE TEMPORAL EN LA CUENCA

Nivel de aptitud	Superficie (ha)	% del total
Muy apta (MA)	39 813	2.4
Apta (A)	94 013	5.6
Marginalmente apta (mA)	107 468	6.4
No apta (NA)	1 444 111	85.7
Total	1 685 405	100

- Una amplia superficie de la cuenca cuenta con una estación de crecimiento para maíz muy corta, debido a un balance hídrico desfavorable; la zona central baja es demasiado seca y caliente
- Grandes zonas tienen pendientes muy inclinadas, especialmente en la Sierra Madre del Sur, la Sierra de Jalmich y el Pico de Tancítaro, lo que implica altos riesgos de erosión
- Porciones importantes corresponden a suelos someros y pedregosos o tienen limitaciones por fases edáficas (alta pedregosidad, fase lítica somera) en diferentes zonas, incluyendo algunas con baja pendiente
- La presencia de heladas en zonas altas limitan la estación de crecimiento. En el NW de la cuenca esto se combina con un balance hídrico no tan favorable.

AGRICULTURA DE RIEGO (TIERRAS POTENCIALMENTE IRRIGABLES POR GRAVEDAD)

El análisis sugiere que la quinta parte de la cuenca (20.9%) sería potencialmente irrigable con sistemas simples por gravedad (figura 9 a color, página 83, y cuadro 22), de acuerdo con su pendiente. Las zonas con pendientes suaves se encuentran en la zona baja de la cuenca, en el valle del Tepalcatepec y los piedemontes vecinos. Es precisamente esta zona la más caliente y con menor cantidad de lluvia, por lo que muestra un balance hídrico más desfavorable y, consecuentemente, para el uso agrícola, es la que tiene mayores requerimientos de riego. En el norte de la cuenca hay algunas planicies de importancia, como la de Cotija y alrededor de Los Reyes. Otras áreas muy aptas, con un balance





CUADRO 22. CLASIFICACIÓN DE LAS TIERRAS POTENCIALMENTE REGABLES POR GRAVEDAD, DE ACUERDO CON SU TOPOGRAFÍA

Nivel de aptitud	Superficie (ha)	% del total
Muy apta (MA)	131 130	7.8
Apta (A)	74 052	4.4
Marginalmente apta (mA)	146 711	8.7
No apta (NA)	1 333 512	79.1
Total	1 685 405	100

hídrico relativamente favorable, se localizan más o menos fragmentadas sobre depresiones interlávicas, en el noreste de la cuenca.

AGRICULTURA CON CULTIVOS PERENNES (FRUTALES ARBÓREOS)

La cuarta parte de la cuenca (25.3%) tiene algún grado de aptitud para su uso con cultivos perennes (figura 10 a color, página 84, y cuadro 23). Esta superficie es mayor que la que resultó para maíz de temporal debido, entre otras causas, a que a pesar de requerir suelos más profundos se pueden utilizar tierras con mayores pendientes, con riesgos de erosión relativamente menores que los que tiene su uso con cultivos anuales. Además, se pueden utilizar especies arbóreas adaptadas a diferentes niveles de humedad disponible y regímenes térmicos. De hecho, algunos frutales de clima templado requieren cantidades variables de horas frío para su producción adecuada y algunos de clima cálido se adaptan a condiciones secas.

Las zonas aptas para cultivos perennes se distribuyen principalmente en la parte norte, noreste y centro de la cuenca, sobre el sistema volcánico transversal (SVT) y aunque existen zonas aisladas en la sierra de Jalmich y en la Sierra Madre del Sur. Buena parte de las áreas del SVT cuentan con un balance hídrico (precipitación-evapotranspiración) relativamente favorable.





**CUADRO 23. CLASIFICACIÓN DE LA APTITUD PARA EL USO CULTIVOS PERENNES
(FRUTALES ARBÓREOS)**

Nivel de aptitud	Superficie (ha)	% del total
Muy apta (MA)	193 271	11.5
Apta (A)	213 994	12.7
Marginalmente apta (mA)	19 570	1.2
No apta (NA)	1 258 570	74.7
Total	1 685 405	100

CUADRO 24. DISTRIBUCIÓN DE LA APTITUD PARA EL USO DE GANADERÍA BOVINA EXTENSIVA

Nivel de aptitud	Superficie (ha)	% del total
Muy apta (MA)	88 766	5.3
Apta (A)	90 666	5.4
Marginalmente apta (mA)	198 327	11.8
Muy apta. Actualmente con agricultura de temporal	40 706	2.4
Apta. Actualmente con agricultura de temporal	129 660	7.7
Marginalmente apta. Actualmente con agricultura de temporal	6 457	0.4
Muy apta. Actualmente con agricultura de riego	235 512	14.0
No apta (NA)	895 311	53.1
Total	1 685 405	100

GANADERÍA BOVINA EXTENSIVA (PASTIZALES, AGOSTADEROS)

Algo más de la quinta parte de la vegetación actual de la cuenca (22.5) puede aprovecharse directamente por el ganado bovino, mediante pastoreo o ramoneo (figura 11 a color, página 85, y cuadro 24). Las zonas más aptas se localizan sobre las laderas del sistema volcánico transversal (SVT), especialmente al oriente, en la sierra de Jalmich y parte de la Sierra Madre del Sur (SMS). Tanto en el SVT como en las parte bajas de la SMS existen importantes zonas aptas para el uso pecuario que hoy





tienen uso agrícola de temporal. Las zonas que actualmente tienen un uso agrícola de riego se consideran muy aptas para la actividad ganadera intensiva.

USO FORESTAL (MADERABLE, DOMÉSTICO)

Los resultados muestran que un poco más de la mitad de la cuenca tiene alguna aptitud para el uso forestal en sus diferentes categorías (figura 12 a color, página 86, y cuadro 25). De acuerdo con las condiciones climáticas y los tipos de vegetación predominantes, la principal superficie de vegetación aprovechable está constituida por la selva baja caducifolia, tanto en su condición primaria como secundaria y que se emplea en mayor medida en el uso forestal doméstico, para la construcción y la obtención de leña. Las zonas con algún grado de aptitud para el uso forestal maderable actualmente (con especies de pino y encino) representan 13.4% y se distribuyen en las partes altas del sistema volcánico transversal y la Sierra de Jalmich; además, existe casi un 10% de vegetación secundaria templada eventualmente utilizable.

CUADRO 25. DISTRIBUCIÓN DE LA APTITUD PARA EL USO EN ACTIVIDADES FORESTALES

Variante de uso forestal	Nivel de aptitud	Superficie (ha)	% del total
Forestal maderable- Vegetación primaria	Muy apta (MA)	110 193	6.5
	Apta (A)	110 766	6.6
	Marginalmente apta (mA)	5 080	0.3
Forestal maderable- Vegetación secundaria	Muy apta (MA)	69 064	4.1
	Apta (A)	89 684	5.3
	Marginalmente apta (mA)	4 137	0.2
Forestal Doméstico- Vegetación primaria	Muy apta (MA)	4 498	0.3
	Apta (A)	19 1184	11.3
	Marginalmente apta (mA)	48 588	2.9
Forestal Doméstico-	Muy apta (MA)	13 110	0.8





CUADRO 25. CONTINÚA

Variante de uso forestal	Nivel de aptitud	Superficie (ha)	% del total
Vegetación secundaria	Apta (A)	179 517	10.7
	Marginalmente apta (mA)	41 256	2.4
No Apto	No Apta (NA)	818 328	48.6
Total		1 685 405	100

CUADRO 26. DISTRIBUCIÓN DE LA APTITUD PARA PARA LA CONSERVACIÓN

DE BIENES Y SERVICIOS

	Superficie (ha)	% del total
Áreas por conservar	633 739	37.6
Otras áreas	1 051 666	62.4
Total	1 685 405	100

Conservación de bienes y servicios ambientales

Las áreas convenientes para la conservación de bienes y servicios ambientales (figura 13 a color, página 87, y cuadro 26) incluyen las áreas naturales protegidas federales y estatales ya decretadas, y las zonas que presentan geoformas correspondientes a conos de piroclastos, conos de piroclastos y lavas, así como los derrames de lava. Estas últimas constituyen áreas de gran importancia hidrológica dada su gran capacidad de infiltración y sus efectos consecuentes en la recarga de acuíferos. Por otra parte, debido a sus características edáficas, ya que cuentan con suelos de muy escaso desarrollo, difícilmente pueden tener otro uso. Comprenden también las áreas con pendientes mayores de 50% que corresponden en buena medida con las zonas de cabecera de las corrientes fluviales y con porciones de vegetación menos alteradas, lo que permitiría la conservación de la biodiversidad propia de las selvas y bosques remanentes con la mejor calidad biológica. Estas áreas benefician a la población de las partes





bajas de la cuenca evitando la erosión del suelo, el azolve de presas, regulando el régimen hídrico, disminuyendo riesgos de inundación y asegurando un flujo continuo de agua de buena calidad para el consumo humano y las actividades productivas.

Áreas críticas para la conservación

En la figura 14 (a color, página 88) se presenta la distribución de las áreas críticas para la conservación de los bienes y servicios ambientales. El análisis espacial efectuado indica que 61 071 ha (3.6% de la cuenca) se encuentran en este estatus, y se ubican en forma dispersa, preferentemente en la cuenca media y alta. Sin embargo, poco más de la mitad de la superficie crítica (30 549 ha) se concentra en 138 sitios mayores de 100 ha cada uno.

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de esta evaluación sólo son aplicables para los TUT especificados, de acuerdo con la metodología y los criterios empleados, considerando la sustentabilidad patrimonial de la cuenca. Los resultados derivan de una evaluación física cualitativa y no significan que no existan otras formas de uso de los recursos que puedan ser posibles, válidas o convenientes. La escala de trabajo usada en el estudio es adecuada a la extensión de la cuenca; sin embargo, hay que tener presente que pequeñas áreas aisladas, como ocurren en zonas montañosas, se han tenido que generalizar para su representación en los mapas.

En términos generales, las unidades morfoedafológicas que tienen un papel importante en la recarga de los mantos acuíferos regionales y locales, corresponden al Sistema Volcánico Transversal y a las unidades transicionales entre éste y el Valle de Tepalcatepec. Destacan los distintos tipos de volcanes y derrames de lava, así como los piedemontes conformados por flujos piroclásticos, avalanchas, lahares y epiclastitas del Pleistoceno-Holoceno, dadas sus características de permeabilidad primaria y secundaria, que favorecen la infiltración de las aguas pluviales. En adición, los piedemontes y las depresiones interlávicas por su posición





y morfometría son unidades que permiten el desarrollo de suelos productivos, como los vertisoles.

Mientras que las laderas de montaña que forman la Sierra Madre del Sur, y que por sus características de pendiente son unidades susceptibles de sufrir procesos de erosión acelerada, deben mantener su cubierta vegetal original a fin de conservar la alta calidad de sus servicios ambientales, como son la regulación climática, la regulación hídrica, la recarga de los mantos acuíferos y la conservación de la diversidad biológica. Las unidades morfoedafológicas del Sistema Neovolcánico y de la Sierra Madre del Sur, cubiertas por bosques y selvas primarias, que en su mayoría corresponden a las áreas de mayor pendiente, son importantes en la captura de gases de invernadero, regulación de caudales de agua, e importantes para las actividades científicas y educativas a favor de la sustentabilidad patrimonial de la cuenca.

Finalmente, las unidades morfoedafológicas asociadas a los fondos de los valles tienen, en general, una alta capacidad de almacenamiento de agua, toda vez que se localizan en las zonas de descarga de las aguas subterráneas que fluyen principalmente del Sistema Volcánico Transversal. Es decir, estas áreas tienen una alta oferta hídrica, por ser unidades depositacionales; además son zonas que favorecen los procesos de formación y desarrollo de suelos profundos con una alta aptitud agrícola.





Estudio de caso utilizando el enfoque SAD Análisis de conflicto de uso de recursos y ordenamiento territorial en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán

INTRODUCCIÓN

El éxito en el diseño de la distribución espacial de usos del suelo está determinado tanto por las fuerzas socioeconómicas que actúan en una región como por las características físicas y biológicas del territorio (Bojorquez-Tapia *et al.* 1994). El esquema de evaluación de tierras propuesto por FAO (1976 y subsiguientes), que se implementó en un sistema experto denominado ALES (*Automated Land Evaluation System*; Rossiter 1996) fue diseñado para la evaluación de diferentes actividades, en particular las agrosilvopastoriles. En años recientes se han desarrollado nuevas técnicas multicriterio enfocadas a la planeación; las mismas permiten la integración de fuentes de datos distintas y la evaluación de tierras para distintos fines. Los sistemas de soporte de decisión espacial basados en técnicas multiatributo y multiobjetivo han probado su utilidad en la evaluación de áreas útiles para uso urbano, conservación y deposición de residuos sólidos, entre otros (Thill 1999).

Un esquema de ordenamiento del territorio puede apoyarse en cualquiera de ambos grupos de técnicas, o bien combinarlas. Por ejemplo, las actividades agrícolas productivas se pueden evaluar por medio del esquema de FAO, mientras que las actividades de asociadas a la conservación-protección, así como uso alternos (industrial o urbano), pueden abordarse por medio de una estructuración jerárquica (Saaty 1994) y diversas técnicas de análisis multiatributo.





En este trabajo se propone un método para diseñar el Ordenamiento Territorial con el uso de técnicas multicriterio y sistemas expertos acoplados a un Sistema de Información Geográfica. El objetivo del procedimiento propuesto es tomar en cuenta para el OT las características del territorio y sus recursos naturales como las actividades humanas e intereses que concurren en la cuenca del lago de Cuitzeo.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del lago de Cuitzeo se encuentra en su mayoría dentro del estado de Michoacán, México. Sólo una pequeña parte corresponde al estado de Guanajuato. La cuenca está localizada en una unidad hidrológica del centro occidente del país, compuesta de materiales volcánicos de carácter intermedio a ácido originados entre el Mioceno y Plioceno (Pasquaré *et al.* 1991). Las grandes unidades de relieve desarrollado sobre estas rocas son colinas, lomeríos y planicies que caracterizan a la cuenca como una región con poca amplitud de relieve y pendientes moderadas (Bocco y Mendoza 2001). La cobertura vegetal característica de la cuenca corresponde a matorrales, bosques y áreas de cultivo (López *et al.* 2002) (figura 15).

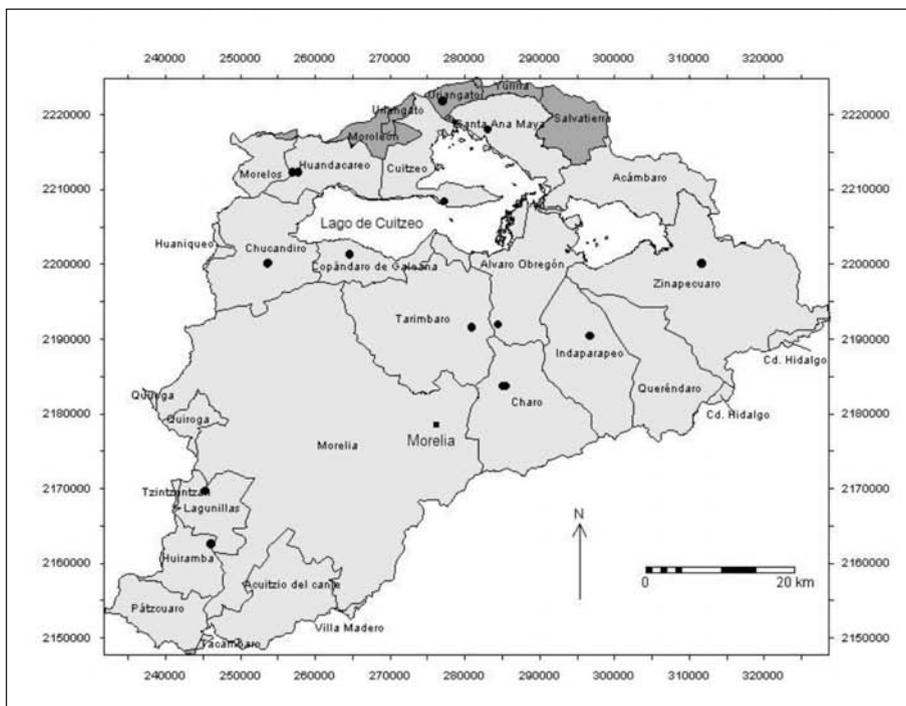
El uso del suelo en la región incluye la agricultura (de riego y temporal), el uso forestal, pecuario y el cultivo de frutales. La cuenca de Cuitzeo alberga a la ciudad de Morelia, urbe que presentó un crecimiento de más de 4.5 veces su tamaño entre 1960 y 1990, que pone en evidencia la falta de planeación en el uso de suelo (Lopez *et al.* 2001) y la necesidad de considerar el uso urbano dentro del ordenamiento del territorio. Debido a los problemas ambientales y la reducción de recursos, en particular la eutroficación, erosión y la reducción de los niveles de agua, es también necesario tomar en cuenta la conservación y restauración como sectores o usos de suelo.

La serie de estudios previos, así como reuniones, talleres, eventos políticos y académicos que se han realizado con objeto de reconocer la problemática ambiental de la cuenca (LXVII Legislatura-UMSNH 1996; CEHCM 1994; UMSNH 2001; Mendoza *et al.* 2001) indican que en ella existe:





FIGURA 15. ÁREA DE ESTUDIO. LOS MUNICIPIOS EN GRIS OSCURO CORRESPONDEN AL ESTADO DE GUANAJUATO, LOS MUNICIPIOS EN GRIS CLARO CORRESPONDEN A ESTADO DE MICHOACÁN





- Deterioro general de los recursos en la cuenca
- Cambio en el uso del suelo, principalmente urbanización y deforestación
- Erosión
- Abatimiento de los niveles de las aguas subterráneas
- Contaminación generada por las actividades urbanas y rurales; dicha contaminación afecta la calidad de los suelos y del agua del lago de Cuitzeo.
- Contracción del vaso del lago de Cuitzeo y eutroficación de sus aguas

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase de inteligencia

Se integró un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la cuenca del lago de Cuitzeo dentro del programa ILWIS 3.1 (ILWIS 2001). El SIG contiene información de cobertura vegetal y uso del suelo y geomorfología generados a partir de la interpretación de fotos aéreas pancromáticas blanco y negro (López *et al.* 2002; Mendoza *et al.* 2001); así como la integración de datos existentes de Geología (Pasquaré *et al.* 1991), Edafología (INEGI 1976, 1986), Erosión, Balance hídrico (Mendoza *et al.* 2001) y datos socioeconómicos (INEGI 1970, 2000, LXVII Legislatura-UMSNH 1996; CEHCM 1994; UMSNH 2001; Mendoza *et al.* 2001).

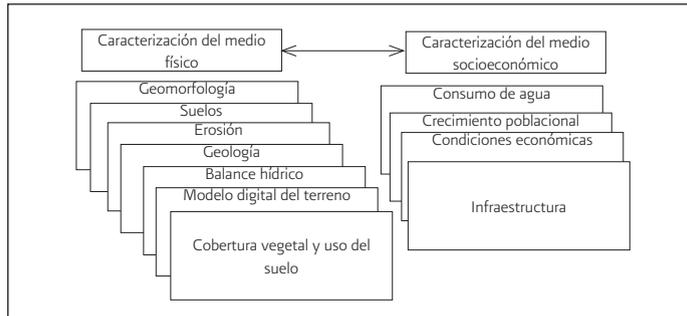
La leyenda utilizada por López y Bocco (2001) para realizar la fotointerpretación de cobertura vegetal contiene diez grandes clases, las cuales agrupan 35 subclases. La modelación espacial implicó la reclasificación o agrupamiento de las 35 subclases en diez clases para el análisis espacial de los datos a nivel de cuenca y 13 clases a nivel de subcuencas y municipios.

La regionalización ecológica se basó en una regionalización geomorfológica de la cuenca del lago de Cuitzeo (Mendoza y Bocco 2001), la cual permitió reconocer unidades de relieve a dos niveles de agregación (zonificación y formas de relieve). Se utilizó el formato raster en todas las coberturas para el Ordenamiento del Territorio (figuras 16 y 17).





FIGURA 16. INFORMACIÓN INTEGRADA AL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO



FASE DE DISEÑO

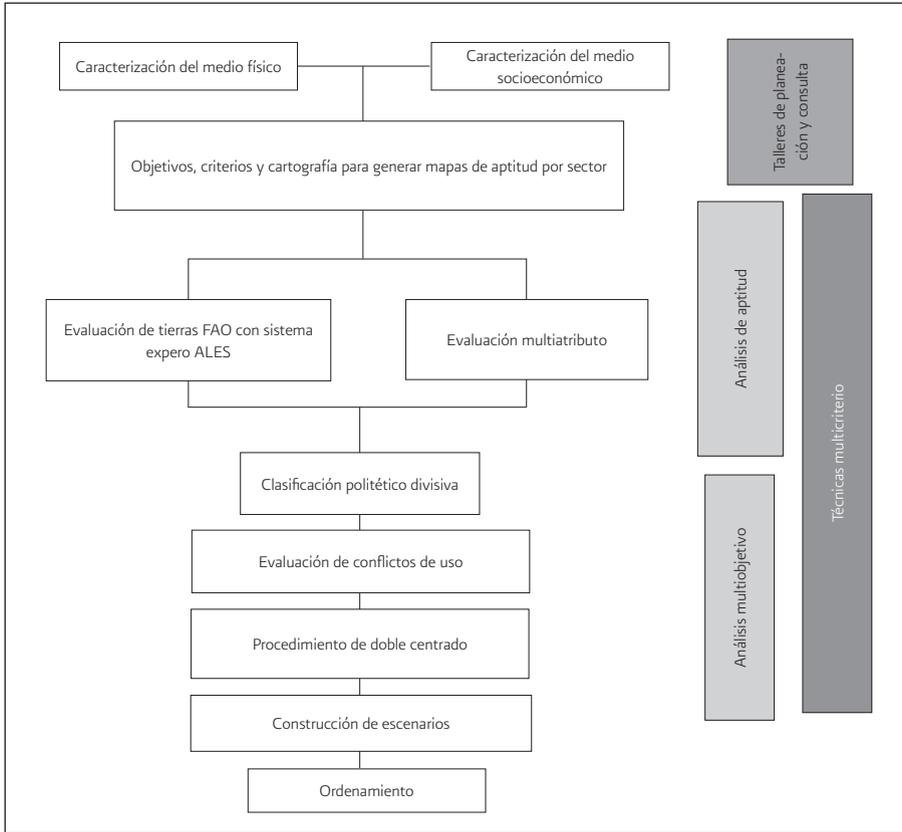
Se identificaron siete usos de suelo o sectores de interés en la región. Estos sectores son: agrícola de riego, agrícola de temporal, frutal caducifolio, forestal, pecuario, urbano y conservación (este último incluye actividades de restauración). Se elaboraron mapas de aptitud de tierras para cada sector por dos métodos distintos. Los mapas de aptitud de uso frutal, agrícola de temporal, agrícola de riego, forestal y pecuario se construyeron a partir de una evaluación de tierras para fines agrícolas y forestales elaborada previamente (Pulido, Pérez y Martínez 2001). Los mapas de aptitud para uso urbano y conservación se obtuvieron mediante un análisis multiatributo. El procedimiento multiatributo incluyó la estructuración jerárquica de los objetivos y criterios espaciales necesarios para ambos usos, así como la estandarización y ponderación de criterios con la técnica de comparación por pares (Saaty 1994). Se elaboraron siete mapas de aptitud, uno por cada uso, a partir de los criterios estandarizados además de los valores de ponderación por criterio obtenidos del multiatributo y la evaluación de tierras. Posteriormente, se utilizó una técnica multiobjetivo que incluye la clasificación numérica multivariada de los mapas de aptitud de uso de suelo a través de una partición politético-divisiva (Bojórquez *et al.* 2001). Como resultado se obtuvo un mapa de aptitudes complementarias y conflictivas (o contrapuestas) de uso de recursos en la cuenca el cual se analizó por un método de doble centrado (Gower 1966) como lo sugiere Bojórquez *et al.* (2001). Al evaluar la informa-





ción de los procesos de cambio, de los conflictos de uso y la aptitud potencial del suelo fue posible construir un esquema de ordenamiento del territorio (figura 17).

FIGURA 17. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DE ORDENAMIENTO DEL TERRITORIO



Evaluación de tierras

El esquema de evaluación de tierras utilizado por Pulido y colaboradores (Mendoza *et al.* 2001), es el recomendado por FAO (FAO 1976; Fresco *et al.* 1992). Este esquema es uno de los más utilizados a nivel internacional, y tiene como virtud el que se puede adaptar a diferentes condiciones y a diferentes disponibilidades de datos. La evaluación de las actividades productivas





se realizó con el programa ALES (Automated Land Evaluation System), versión 4.1, desarrollado en la Universidad de Cornell (Rossiter y Van Wambeke 1997).

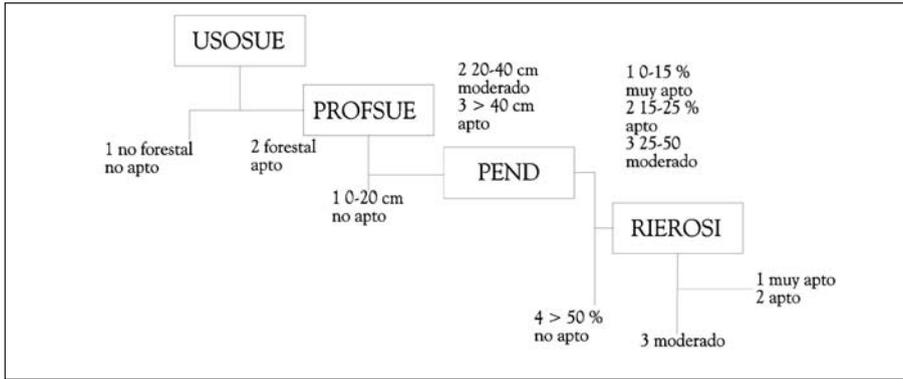
Los tipos de utilización de la tierra (TUT) evaluados en la cuenca de Cuitzeo fueron:

- Cultivos de temporal: cultivados en lomeríos bajos, con pendientes de tres a cinco grados, sobre suelos poco profundos, muchas veces con pedregosidad. Se incluyen cultivos de maíz para consumo humano y sorgo para alimentación de ganado
- Cultivos de riego: cultivos de zonas planas, con disponibilidad de agua de riego y baja pendiente. Los cultivos son, en su mayoría, de sorgo y en segundo grado de importancia de maíz, bajo el sistema de "punta de riego". La mayor parte de las actividades son mecanizadas con el uso de herbicidas, lo que impide el cultivo de gramíneas y leguminosas en asociación.
- Frutales caducifolios: principalmente huertos de durazno, pera, manzana, ciruela y guayaba, en ese orden de importancia. Los frutales se ubican en suelos profundos con baja incidencia de heladas, generalmente en suelos con alta capacidad de retención de humedad.
- Forestal: vegetación arbórea, generalmente de encino, pino y abies, en ocasiones formando bosques mixtos en la parte alta de la cuenca sobre suelos ácidos (Andosol, Acrisol y Luvisol).
- Pecuario: actividad desarrollada principalmente sobre pastizales secundarios manejados pobremente de lomeríos bajos y colinas con baja precipitación y sobre matorrales de la cuenca. El pastoreo de ganado vacuno y caprino en su mayoría asociado con la cercanía de cuerpos de agua.

Se realizaron árboles de decisión para cada uno de los cinco TUT. En la figura 18 ejemplifica este procedimiento con el árbol elaborado para el TUT forestal comercial. Con estos árboles se hizo posible la elaboración de cinco mapas de aptitud dentro de ALES y posteriormente se especializó dentro del SIG (ILWIS 3.1), uno por cada uso.



FIGURA 18. ÁRBOL DE DECISIONES PARA EL TIPO DE UTILIZACIÓN FORESTAL COMERCIAL



Análisis multiatributo

En fechas recientes se ha generalizado el uso del enfoque multicriterio para la evaluación espacial de tierras (Bojórquez *et al.* 2001; Joerin *et al.* 2001; Ce-

FIGURA 19. ANÁLISIS MULTIATRIBUTO PARA EL SECTOR URBANO

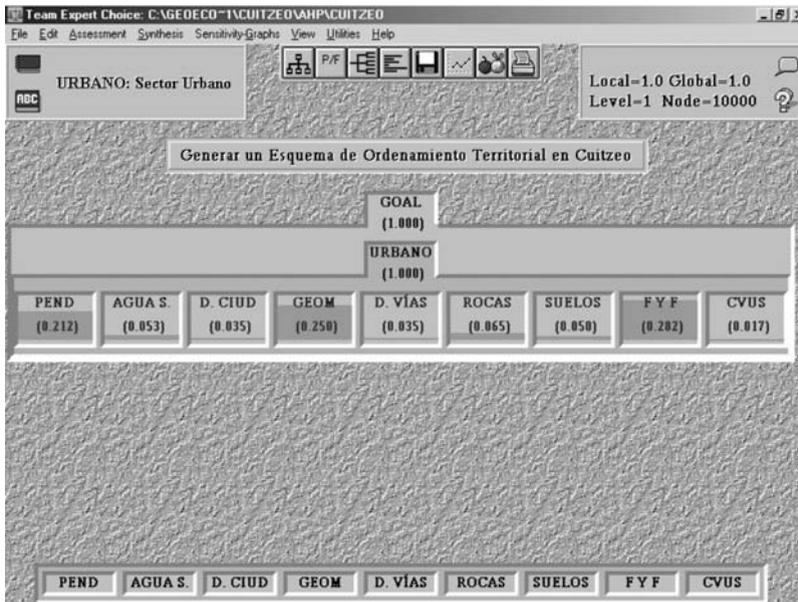
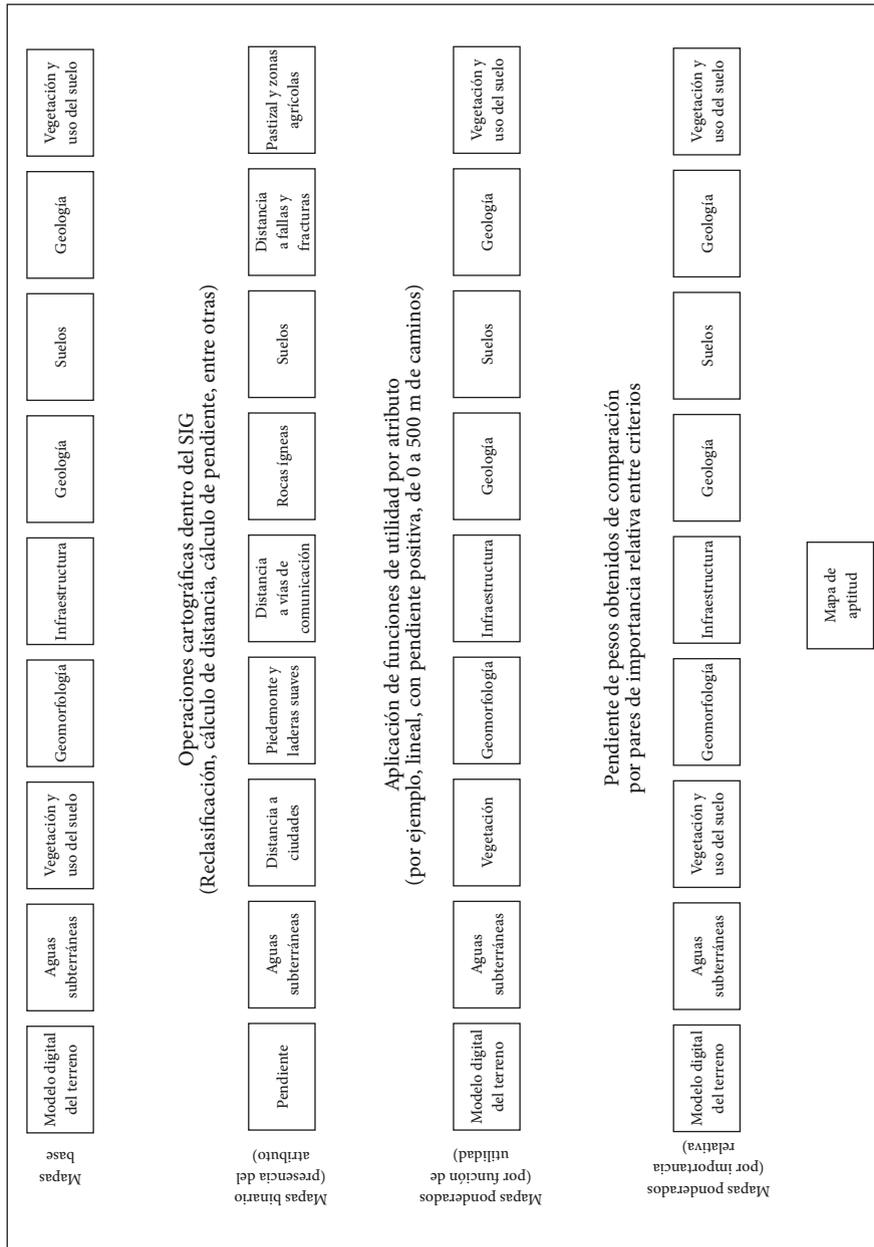


FIGURA 20. MODELO ESPACIAL MULTICRITERIO PARA EL SECTOR URBANO EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEJO





vallos-Silva y López Blanco 2003), son un conjunto de modelos y métodos que apoyan a los tomadores de decisiones para describir, evaluar, ordenar, priorizar, seleccionar o rechazar objetos (candidatos, productos, proyectos, opciones, etc.) de manera estructurada (a través de puntuaciones, valores, o intensidades de preferencia de acuerdo a diversos criterios) (Colson y De Bruyn 1989; Sharifi y Herwinjen 2003).

Los mapas de aptitud para uso urbano y conservación se obtuvieron con este enfoque. En ambos casos se realizó un análisis multiatributo con el apoyo del programa Expert Choice (Forman *et al.* 1983) (figura 19). El procedimiento multiatributo incluyó la estructuración jerárquica de los objetivos y criterios espaciales necesarios para ambos usos, su estandarización y ponderación con la técnica de comparación por pares (Saaty 1994). Adicionalmente, se elaboraron funciones de utilidad para cada criterio. Con estas funciones se asignaron valores de aptitud de acuerdo a la distribución espacial por criterio, lo cual permitió diferenciar mejor la aptitud. Con la ayuda del SIG (ILWIS 3.1) se elaboraron dos mapas de aptitud, uno por cada uso, a partir de la suma ponderada de los criterios estandarizados (Eastman *et al.* 1995; Pereira y Duckstein 1993) y de sus funciones de utilidad. Los criterios espaciales que permiten la identificación de áreas degradadas se incluyeron dentro del uso conservación (figura 20).

Dentro del procedimiento de generación de mapas de aptitud para el sector se consideraron mayores pesos relativos de las unidades geomorfológicas en la definición y ponderación de criterios durante el análisis multicriterio.

Análisis multiobjetivo

Con el objetivo de estimar la magnitud de los conflictos ambientales, se analizaron los siete mapas de aptitud a través de una técnica multiobjetivo que incluyó la clasificación numérica multivariada a través de una partición politético-divisiva. La técnica requirió la aplicación de análisis de componentes principales sucesivos dentro del SIG-ILWIS 3.1 (Bojórquez *et al.* 2001, Noy-Meir 1973; Pielou 1984). Como resultado se obtuvo un mapa de aptitudes que muestra zonas de actividades complementarias y conflictivas (o contrapuestas) de uso





de recursos en la cuenca. Este mapa se analizó por un método de doble centrado (Gower 1966).

Evaluación de conflictos actuales

El análisis de conflictos actuales evaluó la existencia de zonas en las que el aprovechamiento de recursos no está de acuerdo con la capacidad productiva de las unidades geomorfológicas, es decir, pone de manifiesto las unidades en donde no se está llevando a cabo un manejo adecuado y sostenible. El análisis se basa en la comparación de los usos de suelo actuales y los resultados de la evaluación de usos potenciales de la tierra (Rodríguez 1995; Valenzuela 2002).

La detección de conflictos se derivó de la sobreposición espacial de las base de datos de cobertura vegetal y uso del suelo para el año 2000 y las de evaluación de aptitud. La leyenda del mapa de aptitud potencial incluye todos los usos posibles que las unidades de relieve pueden acoger según la evaluación de tierras.

El análisis de conflictos requiere de la construcción de un matriz de dos dimensiones, que permitió tipificar los conflictos. Por ejemplo: "Si en el mapa de aptitud la clase es forestal y en el mapa cobertura de 2000 la clase es cultivos de temporal, entonces reclasificar el mapa y adjudicar a esta zona la clase conflicto forestal-agrícola".

RESULTADOS

Evaluación de tierras

Los mapas de aptitud resultantes de la evaluación de tierras se presentan en la figura 21 (c, d, e, f y g). Las áreas para actividades pecuarias se encuentran principalmente en los piedemontes, planicies y laderas suaves. Las mejores áreas para uso forestal están ligadas a las laderas de inclinadas y a piedemontes. Las áreas más apropiadas para uso agrícola de temporal, de riego y cultivos de frutales, se encuentran en las planicies fluvio-lacustres asociadas al lago de Cuitzeo y sus principales afluentes, en llamado distrito de riego Morelia-Queréndaro.





Análisis multiatributo

Se encontraron dieciocho criterios, nueve por cada sector, que definen la distribución espacial de los sectores conservación y urbano (cuadros 27 y 28). Las áreas delimitadas para conservación se asocian a las laderas de inclinadas y a la rivera del lago de Cuitzeo (figura 21 a, a color, página 89). Las áreas más apropiadas para urbanización están asociadas a los piedemontes y a las laderas suaves (figura 21 a, b, a color, página 89).

Análisis multiobjetivo

Como resultado del análisis multiobjetivo se obtuvieron 11 grupos a través de diez iteraciones del análisis de componentes principales (figura 22 y figura 23, a color, página 91). La primera iteración (PCA1) separó las laderas suaves con

**CUADRO 27. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE ÁREAS
PARA CONSERVACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES**

Criterio	Atributo espacial	Pesos	Función de utilidad
Tipos de cobertura vegetal	Bosques semiabiertos y cerrados; vegetación acuática	0.1	Categórica
Geomorfología	Laderas inclinadas y escarpadas	0.1	Categórica
Clases de pendiente	Mayores a 30 grados	0.1	Lineal
Clases de déficit de agua	Menor a moderado	0.1	Categórica
Densidad de cauces	Mayores a 10 km/km ²	0.1	Lineal
Distancia a poblaciones	Mayor a 3 km	0.1	Lineal
Distancia a caminos	Mayor a 500 m	0.1	Lineal
Distancia al parteaguas	Menor a 5 km	0.1	Lineal
Distancia a ríos	Menor a 500 m	0.1	Lineal

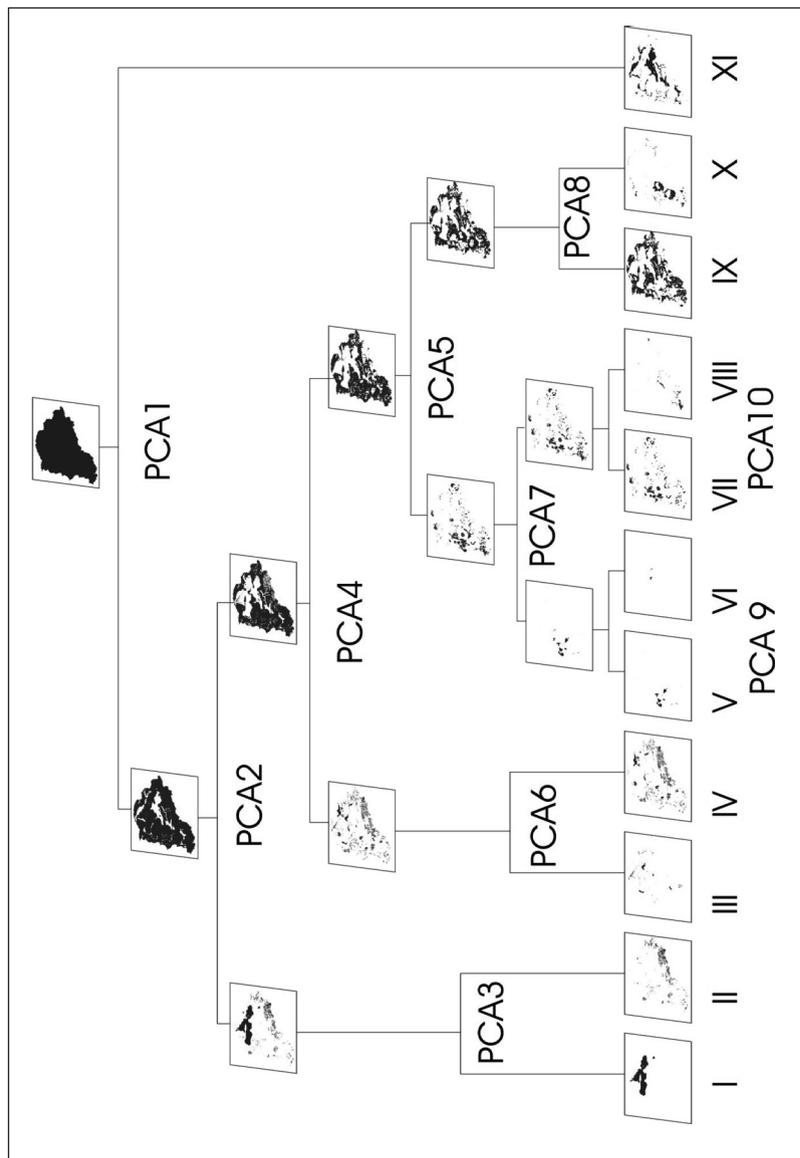


CUADRO 28. CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA SELECCIÓN DE ÁREAS URBANAS POTENCIALES

Requisito	Atributo espacial	Pesos	Función de utilidad
Distancia a fallas y fracturas	Mayores a 100 metros	0.282	Lineal
Geomorfología	Planicie fluvio-lacustre, fluvial, piedemontes, elevaciones aisladas, superficie cumbral, valle angosto y valle amplio.	0.250	Catagórica
Clases de pendiente	Menores a 15 grados	0.212	Lineal
Tipos de rocas	Basaltos, andesitas, dacitas, dioritas, riolitas e ignimbritas.	0.065	Catagórica
Aguas subterráneas	No cuerpos de agua	0.053	Catagórica
Tipos de suelos	Planosol, Luvisol, Gleysol	0.050	Catagórica
Distancia a ciudades	Menor a 1500 metros	0.035	Lineal
Distancia a vías de comunicación y carreteras	Menores a 1500 metros	0.035	Lineal
Tipos de cobertura vegetal y uso del suelo	Bosque abierto y semiabierto, matorrales, pastizales, cultivos de riego y temporal, plantaciones de árboles, y suelo desnudo.	0.017	Catagórica

aptitudes para Agricultura de riego y temporal así como para uso urbano. La segunda iteración (PCA2) excluyó las superficies aptas para el sector conservación (grupos I y II de la figura 22) del resto de usos. La tercera iteración separó

FIGURA 22 CLASIFICACIÓN POLITÉTICO-DIVISIVA (ANÁLISIS MULTICRITERIO) DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO PARA SIETE USOS DE SUELO (VÉASE FIGURA 5) A TRAVÉS DE DIEZ ITERACIONES DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES





claramente las áreas de uso exclusivo para conservación de las áreas en conflicto con otros sectores. La distribución espacial de los usos de suelo y los valores de aptitud para cada uso de suelo muestra que la actividad con mejores valores de aptitud en la cuenca es agrícola (temporal y riego) seguido de pecuario.

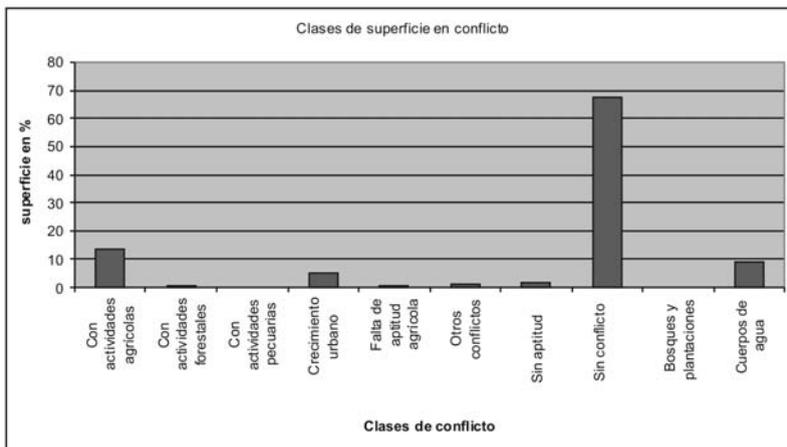
Análisis de conflictos actuales

Este mapa muestra claramente que los principales conflictos de uso del suelo, siendo los más los más importantes: 1) los conflictos con actividades agrícolas (15%) y 2) los conflictos por crecimiento urbano (5%). Alrededor del 70% del área de la cuenca no presenta ningún tipo de conflicto (figura 24 y figura 25, a color, página 92). Los conflictos con actividades agrícolas se presentan porque las áreas cultivadas no tienen vocación para ello, o porque ciertas áreas con cultivos de temporal tienen vocación para riego. Los conflictos por crecimiento urbano corresponden a aquellas áreas en donde existe desarrollo urbano, sin vocación para la urbanización.

Conflictos potenciales en la cuenca

El análisis de residuales de Gower nos permitió conocer los conflictos potenciales de la cuenca del lago de Cuitzeo (figura 26, a color, página 92 y

FIGURA 24. SUPERFICIES OCUPADAS POR LAS CLASES DE CONFLICTO DE USO DEL SUELO





CUADRO 29. NIVELES DE APTITUD PROMEDIO POR SECTOR Y GRUPOS DE APTITUD DE LA CUENCA DE CUITZEO

Grupo	Sector							
	Conser- vación	Fores- tal	Frutal	Pecua- rio	Riego	Tempo- ral	Urbano	Pro- medio grupo
I	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.15
II	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.33
III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.04
IV	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.19
V	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.44	0.13
VI	0.01	0.00	0.00	0.50	0.67	0.00	0.53	0.24
VII	0.01	0.58	0.00	1.00	0.00	0.00	0.46	0.29
VIII	0.01	0.50	0.00	1.00	0.39	0.00	0.64	0.36
IX	0.01	0.50	0.50	1.00	0.00	0.50	0.61	0.45
X	0.00	1.00	0.50	0.50	0.01	0.50	0.63	0.45
XI	0.01	0.50	1.00	1.00	0.97	1.00	0.51	0.71
Pro- medio sector	0.19	0.46	0.18	0.50	0.19	0.18	0.44	0.31

cuadro 29). El grupo I corresponde claramente al área de conservación de los cuerpos lacustres y a sus respectivas zonas de inundación, principalmente con vegetación acuática. El grupo abarca una superficie de 390 km² (10%). El grupo II corresponde a aquellas áreas con conflictos entre actividades de conservación y uso forestal con una superficie de 222 km² (6%) este grupo se localiza principalmente sobre laderas inclinadas y escarpadas localizadas al sur de la cuenca.

El grupo III corresponde a zonas con conflicto entre uso urbano, agrícola de temporal y de riego cultivo de frutales y conservación con una superficie de 36 km² (1%), representa las áreas con bajas cualidades para cada uno de los usos anteriormente descritos. Las zonas corresponden principalmente a zonas de inundación del lago de Cuitzeo y otros cuerpos de agua.





El grupo IV corresponde a las zonas con aptitud forestal con una superficie de 400 km² (10%), se asocia preferentemente a laderas inclinadas y escarpadas al sur de la cuenca.

El grupo V incluye a aquellas áreas en potencial conflicto entre uso pecuario y urbano con una superficie de 51 km² (1%), localizadas principalmente al oeste de la cuenca, sobre coladas de lava.

El grupo VI contiene a los zonas susceptibles para uso agrícola de riego, urbano y pecuario con una superficie de 7 km² (0.2%), localizadas en el centro-oeste de la cuenca. Estas zonas constituyen un sector principalmente de tipo agropecuario asociado a planicies fluviales.

El grupo VII contiene áreas en conflicto entre uso pecuario, forestal y urbano, con una superficie de 295 km² (7%), repartida en pequeñas unidades, asociadas a mesas, superficies cumbresales y piedemontes en toda la cuenca.

El grupo VIII corresponde a los usos potenciales pecuario, agricultura de riego más uso urbano con una superficie de 68 km² (2%), este grupo representa también al sector agropecuario y se localiza en áreas pequeñas asociadas a valles amplios y piedemontes bajos, ubicados en toda la cuenca.

El grupo IX incluye áreas con potencial de uso para ganadería, cultivo de frutales, agrícola de temporal y urbano con una superficie de 1497 km² (38%), es decir, este grupo también representa preferentemente al sector agropecuario, y se localiza sobre laderas suaves y piedemontes en toda la cuenca.

El grupo X corresponde a las zonas con potencial conflicto entre actividades forestales, cultivos de frutales, agrícola de temporal y urbano, con una superficie de 228 km² (6%), es decir este grupo es agropecuario más forestal, con una componentes urbana, asociado a conos volcánicos y piedemontes.

El grupo XI incluye áreas susceptibles de uso agropecuario: cultivos de frutales, cultivos de temporal y riego, y cría de ganado con una superficie de 598 km² (1.5%), este grupo es agropecuario y se asocia a las planicies de la cuenca.





FASE DE SELECCIÓN

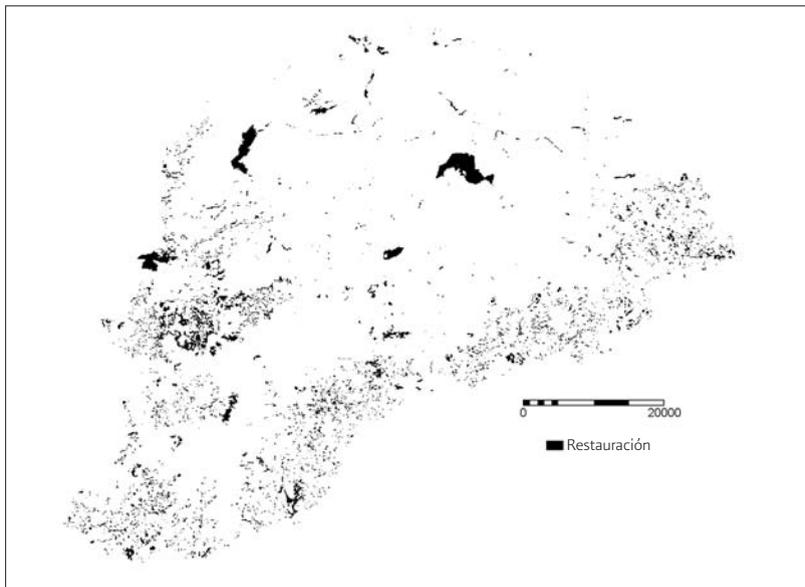
Selección de áreas susceptibles de restauración

Las áreas susceptibles para restauración cubren una superficie de 198 km² de la superficie de la cuenca. Los procesos de degradación detectados son deforestación (9%), erosión severa (0.2%) y la contracción del lago por falta de aporte de agua (10%). En consecuencia, las áreas sujetas a estos procesos fueron seleccionadas como áreas en las que se deberá promover la contención del deterioro y el restablecimiento de los servicios ambientales. La distribución espacial de las áreas de restauración se presenta en la figura 27.

Evolución de los conflictos ambientales

El incremento poblacional en la cuenca demanda un mayor uso del recurso hídrico, especialmente para la actividad agrícola de riego y el uso urbano (López et

FIGURA 33. DISTRIBUCIÓN DE LAS ÁREAS QUE REQUIEREN RESTAURACIÓN





al. 2001). En este sentido, es recomendable la implementación de una política que colabore a reducir los consumos de agua, especialmente en la ciudad de Morelia. Las políticas de asentamiento en la ciudad de Morelia también deberán promover la densificación de la ciudad, más que su expansión sobre los terrenos agrícolas y con vegetación arbórea que la circunda, además de promover el desarrollo urbano regulado y controlado.

De no considerarse la implementación de políticas territoriales que promuevan los usos de suelo propuestos, la expansión de las manchas urbanas, en especial la referente a la capital del estado, tendrá como consecuencia la reducción de los niveles de agua subterránea, los cuales según investigaciones recientes indican son recargados por la infiltración del agua en las elevaciones localizadas al sur de la cuenca y de la ciudad de Morelia (Garduño, comunicación personal), sitios que actualmente sufren una fuerte presión por el crecimiento urbano.

Aunado a lo anterior, la emisión de aguas negras de la ciudad de Morelia, seguirá contaminando los terrenos agrícolas de riego del llamado Valle Morelia-Queréndaro, y finalmente se incrementarán los niveles de contaminación del lago de Cuitzeo, especialmente en su porción central, área de arribo de la mayoría de los drenes de riego agrícola. El incremento en contaminantes seguirá favoreciendo tanto la pérdida de biodiversidad en el lago como el crecimiento de vegetación acuática (lirio y tular), que a su vez seguirá restringiendo los flujos de agua en el lago.

RECOMENDACIONES

La promoción de manera equilibrada del desarrollo socioeconómico, paralelamente con espacios geográficos suficientes para mantener los bienes y servicios ambientales que sustentan las actividades productivas, garantiza el desarrollo sustentable de una región. Dicho desarrollo se basa en la delimitación de políticas territoriales que reflejan el potencial y las limitantes naturales de la región.

Los resultados anteriores permiten sugerir que las políticas de ordenamiento territorial deben ir encaminadas a disminuir la dinámica de cambio de los procesos de deforestación, deterioro de bosques y urbanización. Es necesario impulsar las políti-





cas de restauración de la cuenca, promoviendo los cambios relacionados con la matorralización y reforestación que revierta la degradación ambiental de los sitios definidos por el análisis; también deben promoverse las políticas de conservación de las áreas estratégicas que sustentan los bienes y servicios ambientales de la cuenca.

Basados en la evaluación de tierras, el análisis de conflictos de uso del suelo, el análisis del cambio de la cobertura vegetal y uso del terreno, y el análisis multicriterio, así como de las condiciones socioeconómicas de la región, se delimitaron superficies de ser manejadas bajo las siguientes políticas territoriales:

- Aprovechamiento:
 - Usos forestal
 - Usos frutícola
 - Usos pecuario
 - Usos agrícola de riego
 - Usos agrícola de temporal
 - Usos agropecuario
 - Usos urbano
- Conservación
- Restauración

Las políticas de aprovechamiento promueven el desarrollo y reconocen la necesidad de modificar o perder servicios ambientales; sin embargo, también deben estar restringidas a la oferta ambiental de las mismas, que en consecuencia no ponga en riesgo la sustentabilidad de los sistemas productivos. En este sentido, las zonas susceptibles de aprovechamiento forestal requieren la elaboración de un plan de manejo forestal que defina cuanta madera puede ser extraída y cuales son los mejores sitios forestales.

Las áreas susceptibles para uso frutícola y de agricultura de riego en la cuenca requieren mejorar las técnicas de riego para minimizar las pérdidas del recurso agua. Además, esta zona requiere ser regada con aguas tratadas, ya que actualmente es irrigada con aguas negras provenientes de la ciudad de Morelia. La colocación de plantas de tratamiento de aguas negras no sólo minimizará la degradación de las





tierras por contaminación, sino que tendrá efectos muy positivos en la restauración y conservación de cuerpo de agua del lago de Cuitzeo.

Las políticas territoriales indicadas anteriormente, pueden ser implementadas en alrededor de 200 unidades de gestión ambiental (UGA) basadas en la zonificación geomorfológica, las cuales son apropiadas para el manejo a nivel de cuenca, y 1,000 UGA basadas en la segmentación a nivel de formas de relieve, éstas últimas útiles para el manejo de recursos a nivel municipal y de subcuencas.

CONCLUSIONES

En general, el método multiobjetivo desarrollado por Bojorquez genera mapas con zonas que han sido calificadas píxel a píxel; por lo tanto, la distribución de las zonas evaluadas puede estar muy fragmentada. Dadas las características de las formas de relieve (unidades relativamente homogéneas en función de las rocas, suelos y pendientes) se consideraron mayores pesos relativos de estas unidades en la definición y ponderación de criterios durante el análisis multicriterio y la evaluación de tierras. Este enfoque tiene la ventaja de permitir la generación de unidades de aptitud asociadas a un modelo geográfico de discretización de la naturaleza más que a un modelo de celdas, sin representación en la misma naturaleza.

La utilización de datos de relieve, suelos y cobertura vegetal y uso del suelo fue la base de la generación de un modelo geográfico de discretización del territorio en unidades abióticas y bióticas. En este trabajo se reconoce el valor de los sistemas clasificatorios jerárquicos (relieve y cobertura) los cuales fueron un excelente marco para organizar y estructurar los datos que permitió la elaboración de la evaluación de la aptitud de las tierras, el análisis multicriterio y la delimitación de unidades de gestión ambiental (UGA).

La selección de las áreas susceptibles para restauración se basó en un modelo conceptual que integró el análisis de cambio de la uso de la cobertura vegetal y uso del terreno y el análisis de conflictos.

El modelo de evaluación multiatributo con intención de generar el mapa de aptitud potencial para la distribución de áreas urbanas proporcionó un peso relativamente alto a las unidades de relieve, debido a que ellas corresponden a unida-





des relativamente homogéneas y en consecuencia, el resultado del modelo permite generar áreas geográficas más que puntos aislados en el espacio.

Los distintos mapas de aptitud para actividades productivas, conservación y urbanización se sometieron a una clasificación numérica supervisada a fin de identificar áreas geográficas con valores similares de aptitud. La clasificación se realizó a través de una técnica politético divisiva.

En consecuencia se interpreta que los verdaderos procesos de degradación se dan a nivel de la urbanización creciente, descargas de aguas negras al vaso del lago de Cuitzeo y pérdida la calidad de los bosques en algunos sectores de la cuenca. Por lo tanto las políticas de OT deben ir encaminadas disminuir la dinámica de cambio de los procesos de deforestación, deterioro de bosques y urbanización. Además de promover los cambios relacionados con la matorralización y reforestación de la cuenca, mediante una política de restauración que revierta la degradación ambiental; y políticas de conservación de las áreas estratégicas que sustentan los bienes y servicios ambientales de la cuenca.

En este trabajo, la integración coherente de la regionalización geomorfológica, del análisis de la cobertura vegetal y uso del suelo, de la evaluación de tierras y del análisis multicriterio enmarcado en el uso de un sistema de información geográfica permitió construir un método útil en la generación del modelo de ordenamiento territorial de la cuenca del lago de Cuitzeo, el cual puede ser replicado en áreas con características similares.





GLOSARIO

Álgebra lineal. Rama de las matemáticas dedicada al estudio de vectores, espacios vectoriales, transformaciones lineales, y sistemas de ecuaciones lineales. El álgebra lineal es una representación concreta en la geometría analítica. Los espacios vectoriales son tema central en la matemáticas modernas por lo que, el álgebra lineal es usada ampliamente en álgebra abstracta y análisis funcional.

Alternativa. (Del fr. *alternative*). 1. f. Opción entre dos o más cosas. 2. f. Cada una de las cosas entre las cuales se opta (RAE 2001). En el contexto de la toma de decisiones, una alternativa puede representar diferentes cursos de acción, diferentes hipótesis acerca de alguna característica, diversas clasificaciones, entre otras (Eastman 2001). Desde la perspectiva de la toma de decisiones espaciales, cada alternativa de decisión espacial consiste de al menos dos elementos: la acción y la ubicación geográfica donde la acción se lleva a cabo (Malczewski 1999).

Análisis: 1. Separación estructurada de cualquier entidad (material o abstracta) en los elementos que la componen con el objeto de mejorar la comprensión del mismo (Forman y Selly 2001).

Booleano. Conjunto de números {0 y 1} que permiten expresar presencia o ausencia de algún atributo. En matemáticas y ciencias afines, el álgebra booleana se dedica al uso de técnicas algebraicas para manejar expresiones en la rama del "cálculo de proposiciones".

Combinación lineal ponderada o suma ponderada. Técnica multicriterio que permite combinar factores continuos aplicando un peso a cada factor seguido de una suma de los pesos, lo cual resulta en un índice o valor de aptitud. La ecuación general que describe este procedimiento es, según Eastman 2001:





$$S = \sum (W_i X_i)$$

Donde:

S = índice de aptitud

W_i = Peso para el factor i

X_i = Valor del factor i

Comparación por pares. Técnica de medición de criterios que forma parte del proceso de análisis jerárquico a través de la formalización de juicios de valor. El proceso de comparación por pares es un método que permite conocer la importancia relativa (pesos) que tiene cada criterio utilizando palabras, números o gráficos (Forman y Selly 2001). Como resultado de la aplicación de esta técnica se utiliza una combinación lineal ponderada en donde la suma de valores o pesos de cada criterio es igual a uno.

La técnica de Saaty (1980) obtiene estos pesos calculando el eigenvector principal de una matriz cuadrada recíproca que contiene las comparaciones uno a uno entre los criterios. Las comparaciones vertidas en cada celda de la matriz, contienen la importancia relativa entre dos criterios con relación al éxito o contribución que hace cada criterio respecto al objetivo establecido. Los juicios de valor se realizan con números (del 0 al 9) en una escala que se puede transformar en palabras (extremadamente importante, muy importante, importante, poco importante, igual; y el caso inverso), o bien en graficas de barras, entre otras (Forman y Selly 2001, Eastman 2001).

Conflicto. (Del lat. *conflictus*). Diferencias, oposición y en ocasiones coerción entre grupos de una sociedad sobre sus valores y comportamiento frente al uso de los recursos, bienes o servicios compartidos (Crowford y Wondolleck 1990). En el dominio de la toma de decisiones, se dice que existe un conflicto cuando un individuo o grupo de individuos percibe una diferencia entre el estado presente y el estado deseado (Ackoff 1981). Las características del conflicto incluyen además que: 1) el individuo o grupo tiene varios cursos de acción o alternativas, 2) la acción escogida puede tener un efecto significativo sobre la diferencia percibida y que 3) el individuo o grupo tiene incertidumbre a priori sobre cual alternativa debe ser seleccionada.

Criterio. (Del gr. *kritérion* y del lt. *-krino*). 1. m. Norma para conocer la verdad. 2. m. Juicio o discernimiento. (RAE 2001). Juicios de valor o reglas sobre las que se evalúan y ponderan las alternativas de decisión. Incluye los conceptos de atributo y objetivo (Malckzewski, 1999, Eastman 2001). Los criterios pueden ser de dos tipos: factores y restricciones.

Decisión racional. Proceso de selección y análisis entre alternativas que satisface mejor uno o varios objetivos (Forman y Selly 2001).

Estado. (Del lat. *status*) 1. m. Situación en que se encuentra alguien o algo, y en especial cada uno de sus sucesivos modos de ser o estar (RAE 2001). En el análisis de decisio-





nes, “estado” se refiere a las variables definitorias del sistema (por ejemplo, en un sistema gaseoso las variables de estado son volumen, masa, presión).

Evaluación. (De evaluar; Del fr. *évaluer*). Proceso de comparación y aplicación de reglas de decisión (Eastman 2001).

Factor. (Del lat. *factor*, *-ōris*). Criterio que mide la aptitud de una alternativa específica de la actividad en consideración. Frecuentemente se mide en escalas continuas, también se les conoce como “variables de decisión” o “variables estructurales” (Eastman 2001).

Función de selección. Regla de decisión que provee un método matemático de comparación entre alternativas. Generalmente incluyen alguna forma de optimización (maximización o minimización de alguna característica medible). Teóricamente requieren que cada alternativa se evalúe independientemente de las demás (Eastman 2001). También se le conoce como función de utilidad.

Grupo de interés. Individuo o grupo de individuos que hace o desea hacer uso de los recursos, bienes o servicios de una región. También se denomina “sector” o “actor”.

Heurística de selección. Regla de decisión que especifica un procedimiento a seguir en lugar de una función a ser evaluada. En algunos casos provee una solución idéntica a una función de selección, en otros casos sólo proporciona una aproximación. Generalmente se escogen al ser más sencillas de entender y de calcular (Eastman 2001).

Jerárquico. 1. Agrupación de entidades (materiales o abstractas) en niveles sucesivos de importancia, de acuerdo a sus afinidades, tipo de entidad o su contribución al conjunto. ¿Por qué jerarquizar? Porque es la mejor manera de entender problemas complejos; de hecho, hacer jerarquías es la forma que tiene la inteligencia finita (los seres humanos) para enfrentarse a la comprensión de los sistemas complejos (Simon 1960).

Juicio de valor. (Del lat. *iudicium*). Opinión, parecer o dictamen (RAE 2001). Los juicios de valor en la toma de decisiones representan las opiniones, preferencias o prioridades de los grupos de interés y tomadores de decisiones, basados en la intuición, encuestas *ad hoc*, cuestionarios y comentarios, entre otros (Malckzewski 2004).

Opción. (Del lat. *optio*, *-ōnis*). 1. f. Libertad o facultad de elegir. 2. f. Cada una de las cosas por las que se puede optar (RAE 2001).

Optimizar. 1. tr. Buscar la mejor manera de realizar una actividad (RAE 2001). Técnica matemática que intenta dar respuesta a un problema del tipo: encontrar los valores máximos o mínimos de una función objetivo:

$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ cuyas variables están sujetas a restricciones

$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ ó $f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \dots$

Según el nivel de generalidad que tome el problema será la resolución que se plantee de entre los siguientes tipos:

1) *Optimización clásica*





Si la restricción no existe, o es una restricción de igualdad, con menor o igual número de variable que la función objetivo, entonces el cálculo diferencial da la respuesta, ya que sólo se trata de buscar los valores extremos de una función.

2) Optimización con restricciones de desigualdad-optimización no clásica

Si la restricción contiene mayor cantidad de variables que la función objetivo, o la restricción contiene restricciones de desigualdad, existen métodos en los que en algunos casos se pueden encontrar los valores máximos o mínimos. Si tanto restricciones como función objetivo son lineales, la existencia de máximo (mínimo), está asegurada, y el problema se reduce a la aplicación de unos simples algoritmos de álgebra lineal elemental, los llamados método simplex y el método dual. Sin embargo, si estas condiciones no se cumplen, existen las llamadas condiciones de Khun-Tucker, las cuales en algunos casos pueden ser utilizables para probar encontrar puntos críticos, máximos o mínimos. Ésta es un área aún muy poco desarrollada de la matemática; frecuentemente las condiciones de Khun y Tucker fallan, o no son suficientes, para la existencia de extremos.

3) Optimización con información no perfecta

Existe un tercer caso donde la cantidad de variables, o más aún la función objetivo puede ser desconocida o también variable. En este campo, la matemática conocida como matemática borrosa (*fuzzy*), está realizando esfuerzos por resolver el problema. Sin embargo, su desarrollo es aún demasiado incipiente para ofrecer resultados satisfactorios.

Proceso. Serie de acciones, cambios o funciones que permiten llegar a un resultado o cumplir un fin (Forman y Selly 2001).

Proceso de análisis jerárquico (AHP, Analytic Hierarchical Process). Regla de decisión multicriterio desarrollada por Saaty (1980) cuya motivación es facilitar la toma de decisiones. Este método intenta satisfacer la mayor cantidad de objetivos establecidos en la toma de decisiones. Se basa en tres principios (Forman y Selly 2001, Malczewski 2001):

1. Descomposición del problema en objetivos, criterios y reglas de decisión, en una estructura jerárquica.
2. Juicios comparativos por pares del mismo nivel jerárquico entre los objetivos y criterios, con respecto al nivel superior de la jerarquía.
3. Síntesis de criterios y objetivos prioritarios. Su objetivo es la construcción de un grupo de prioridades compuesto para los elementos al nivel más bajo de la jerarquía (criterios).

La función matemática que describe este método es:

$\max (\sum_j w_j w_{ij}; \sum_j w_j = 1)$ Donde:





w_j es el vector de prioridades asociado con el j -ésimo elemento de la estructura jerárquica de criterios

w_{ij} son las prioridades del vector derivadas de la comparación de alternativas en cada criterio

Al utilizarse este método en un sistema espacial para la toma de decisiones generalmente se asocian los pesos derivados del AHP a mapas de atributos, de manera que exista una combinación entre el peso y los valores de la cobertura de manera similar a los métodos de combinación lineal ponderada.

Problema. (Del lat. y gr. *problêma*) 1. m. Cuestión que se trata de aclarar. 2. m. Proposición o dificultad de solución dudosa. 3. m. Conjunto de hechos o circunstancias que dificultan la consecución de algún fin. 4. m. Planteamiento de una situación cuya respuesta desconocida debe obtenerse a través de métodos científicos (RAE 2001).

Regla de decisión. Procedimiento por el cual se realiza la selección y combinación de criterios con el fin de llegar a una evaluación particular. Las reglas de decisión frecuentemente contienen procedimientos para combinar criterios en un índice compuesto y una aseveración sobre la forma en que se compararan las alternativas con ayuda de este índice (Eastman 2001).

Existen distintos métodos utilizados para combinación y construcción de las reglas de decisión. Entre los principales están (Malczewski 2001):

- 1) Combinación lineal ponderada,
- 2) Valuación multiatributo,
- 3) Proceso de análisis jerárquico,
- 4) Métodos de búsqueda del punto ideal
- 5) Métodos de selección iterativa del máximo (*outranking*)
- 6) Ordenación ponderada promedio
- 7) Programación por objetivos
- 8) Programación por compromiso

Restricción. (Del lat. *restrictiô*, *-ônis*). Criterio que limita las alternativas puestas a consideración. Implica la exclusión, limitación en superficies o umbrales máximos o mínimos de factores. Frecuentemente se expresa en términos booleanos (Eastman 2001).

Sistemas espacialmente explícitos de apoyo para la toma de decisiones (SADS). Sistema de consulta y análisis basado en computadoras que frecuentemente utiliza técnicas de inteligencia artificial (IA) para "capturar" o "emular" el conocimiento y proponer o ayudar en la resolución de problemas espaciales.

La integración entre los SAD y los sistemas de información geográfica (SIG) permite proponer soluciones objetivas a una amplia gama de problemas de decisión espacialmente explícita. A esta integración se le conoce como sistemas espacialmente explí-





ritos de apoyo para la toma de decisiones (SEAD) (Sharifi y Herwinjen 2003). Las tecnologías de información espacial, como los SEAD, cubren la necesidad de una herramienta que permita a las comunidades rurales explorar sus opciones de uso de suelo y evaluar los impactos potenciales del cambio de uso del suelo al mismo tiempo que integran el propio conocimiento acerca de su manejo (Robbins 2003, Brodnig y Mayer 2000).





Bibliografía

- Ackoff, R. L. 1980. *Redesigning the Future: A Systems Approach to Societal Problems*. John Wiley & Sons, Nueva York, EUA, 332 pp.
- Alter, S. 1977. A taxonomy of decision support systems. *Sloan Management Review* 19(1):37-56.
- Anthrop, M. 2001. The language of landscape ecologists and planners. A comparative content analysis of concepts used in landscape ecology. *Landscape and Urban Planning* 55:167-173.
- Bacic, I. L. Z., D. G. Rossiter y A. K. Bregt. 2003. The use of land evaluation information by land use planners and decision-makers: a case study in Santa Catarina, Brazil. *Soil Use and Management* 19:12-18.
- Beek, K. J. 1978. Land evaluation for agricultural development. Some explorations of land use systems analysis with particular reference to Latin America. ILRI, Wageningen, Holanda.
- Bocco, G., Mendoza, M. y A. Velázquez. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphologic mapping- A tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology* 39:211-219.
- Bojórquez-Tapia, L. A., S. Díaz Mondragón y E. Ezcurra. 2001. GIS-based approach for participatory decision-making and land suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science* (15)2:129-151.
- Botequilla, L. y J. Ahern. 2002. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning; *Landscape and Urban Planning* 59:65-93.
- Brodnig, G. y V. Mayer. 2000. Bridging the gap: the role of spatial information technologies in the integration of traditional environmental knowledge and western science. *The*





- Electronic Journal on Information Systems in Developing Countries* 1:1:1-15. Disponible en: <http://www.ejisdc.org>.
- Bryan, B. A. 2003. Physical environmental modeling, visualization and query for supporting landscape planning decisions. *Landscape and Urban Planning* 65:237-259.
- Butcher, C. S., Matheus, K. B. y A. R. Sibbald. 1996. The implementation of a spatial land allocation decision support system for upland farms in Scotland; Proceedings of the 4th Congress of the European Society for Agronomy; Wageningen, Velghaven, Holanda, 7-11 pp.
- Ceballos-Silva, A. y J. López-Blanco. 2003. Evaluating biophysical variables to identify suitable areas for oat in central Mexico: a multicriteria and GIS approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95: 371-377.
- CNA-SMN. 2000. Sistema ERIC II. Datos mensuales de las estaciones climatológicas de la cuenca del río Tepalcatepec, México.
- Colegio de Postgraduados. 1991. *Manual de conservación de suelo y agua*. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- . 1990. Manual de la metodología para evaluar la aptitud de las tierras para la producción de cultivos básicos en condiciones de temporal. Programa de Agrometeorología. Colegio de Postgraduados, México.
- , SARH. 1991. *Manual de conservación del suelo y del agua. Instructivo*. Tercera edición. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Colson, G. y Chr. De Bruyn. 1989. *Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making*. Pergamon, Oxford.
- Comisión Ecológica del Congreso de Michoacán (CEHCM). 1994. El deterioro Ambiental de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Morelia, Michoacán, 82 pp.
- Cools, N., D. De Pauw y J. Deekers. 2003. Towards an integration of conventional land evaluation methods and farmers' soil study assessment: a case study in northwestern Syria. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95:327-342.
- Crowford, J. E. y J. M. Wondolleck. 1990. *Environmental Disputes, community involvement in conflict resolution*. Island Press, Washington, D.C., EUA.
- Dent, David y Anthony Young. 1981. *Soil survey and Land Evaluation*. Allen & Unwin, Londres.
- DSSResources.com. Página web: <http://DSSResources.COM/history/dsshhistory.html>, version 2.8, 31 de mayo de 2003, consultada el 26 julio de 2003.
- Duch Gary, J., A. Bayona Celis, C. Labra Loza y A. Gama Vera. 1981. Sistema de Evaluación de Tierras para la determinación del Uso Potencial Agropecuario y Forestal en México. *Geografía Agrícola* 1:21-46.
- Eastman, J. R. 2001. *Guide to GIS and Image Processing*. Volumen 2. Capítulo 1. Decision Support: Decision Strategy Analysis. Clark University, Worchester, EUA, pp. 1-40.





- Eastman, J. R., P. A. K. Kyem, J. Toledano y W. Jin. 1993. *GIS and Decision Making*. UNITAR, Genova.
- Eckenrode, R. T. 1965. Weighting Multiple Criteria. *Management Science* 12:3:180-192.
- FAO. 1997. *Zonificación agroecológica. Guía general*. Boletín de suelos de la FAO, No. 73. FAO, Roma, 82 pp.
- . 1993. FESLM: An international framework for evaluating sustainable land management. World soil resources reports 73. Roma. Disponible en: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep.
- . 1992. Land evaluation and farming system analysis for land use planning. FAO Working Document. FAO, Roma, ITC, Enschede, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- . 1985a. Directivas: evaluación de tierras para la agricultura en secano. Boletín de suelos de la FAO 52. FAO, Roma.
- . 1985b. *Guidelines: land evaluation for irrigated agriculture*. Soils Bulletin 55. FAO, Roma.
- . 1984. *Land evaluation for forestry*. Forestry Papers 48. FAO, Roma.
- . 1983. *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. Soils Bulletin 52. FAO, Roma.
- . 1978. Report on the Agroecological Zones Project. Vol. 1, Methodology and Results for Africa. World Soil Resources Report No. 48. FAO. Rome. 158p.
- . 1976. Esquema para la evaluación de tierras. Boletín de Suelos de la FAO No. 32. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia, 66 pp.
- . 1976a. *A framework for land evaluation*. Soils Bulletin 32. FAO, Roma.
- Farina, A. 1997. *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Kluwer. 235 pp.
- Fohrer, N., D. Moller y N. Steiner. 2002. An interdisciplinary modeling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth* 27:655-662.
- Forman, R. y M. Godron. 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley & Sons, Nueva York, EUA, 620 p.
- Forman, E. H. y M. A. Selly. 2001. *Decision by Objectives – How to Convince Others that You are Right*. World Scientific Press.
- Forman, E., T. Saaty y M. A. Selly. Walkron, Expert Choice, Decision Support Software. McLean, V.A., EUA.
- Fresco, L. O.; Huizing, H., van Keulen, H., Luning, H., Schipper, R. A. 1992. Land evaluation and farming systems analysis for land use planning. FAO working document. FAO/Rome, ITC/Enschede, Wageningen Agric. Univ., 208 pp.
- Fuentes, J. J. (en preparación). Evaluación del recurso hídrico en el Pico de Tancítaro. Tesis de doctorado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.





- Gallant, A. L., T. R. Whiter, D. P. Larsen, J. M. Omernik y R. M. Hughes, 1989. Regionalization as a tool for managing environmental resources. Environmental Protection Agency. Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon, EUA, 152 pp.
- García, Enriqueta. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Cuarta edición. Larios, México, 217 pp.
- Geneletti, D. 2002. *Ecological Evaluation for Environmental Impact Assessment*. Netherlands Geographical Studies, Utrecht, 218 p.
- Geneletti, D. 2004. A GIS-based decision support system to identify nature conservation priorities in an alpine valley. *Land Use Policy* 21(2):149-160.
- Gil, N. 1979. *Watershed Development with special reference to soil and water conservation*. FAO Soils Bulletin No. 44. FAO, Roma, 257 pp.
- Gómez, D. 1994. *Ordenación del territorio: una aproximación desde el medio físico*. Instituto Tecnológico Minero de España, 238 pp.
- González M. A. 1997. *Métodos alternativos de manejo de conflictos. Aplicaciones en materia ambiental*. SEMARNAP, CECADESU, PNUD, Mexico, 81 p.
- Gower, J. C. 1966. Some distance properties of latent roots and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika* 53: 325-338.
- Holling C. S. (ed.). 1978. Adaptive environmental management. Assessment and management. John Wiley and Sons, Toronto.
- ILWIS, Integrated Land and Water Management Information System. 2001. User's Manual. International Institute for Aerospace and Earth Science (ITC), Enschede, Holanda.
- INEGI. 2004. Guías para la interpretación de Cartografía. Edafología. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, 28 pp.
- . 1998 (inédito). Uso potencial agrícola, forestal y riesgos de deterioro ambiental. En: El Colegio de México, Instituto Nacional de Ecología. Ordenamiento ecológico para la región Mariposa Monarca. Anexos. SEMARNAT, México.
- Jankowski P., N. Andrienko y G. Andrienko. 2001. Map-centered exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. *Int. J. Geographical Information Science* 15(2):101-127.
- Joerin, F. M. Thériault, y A. Musy. 2001. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science* 15(2):153-174.
- Kalogirou, S. 2002. Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation. *Computers. Environment and Urban Systems* 26:89-112.
- Karlen, D., C. Ditzler y S. Andrews. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114(3-4):145-156.





- Klingebliel, A. A. y P. H. Montgomery. 1961. Land Capability Classification. Agricultural Handbook No. 210, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service. (Se sugiere revisar Douglas Helms. *The Development of the Land Capability Classification*. Reimpreso en D. Helms. 1992. *Readings in the History of the Soil Conservation Service*. Soil Conservation Service, Washington, D.C., pp. 60-73. Disponible en: <http://www.nrcs.usda.gov/about/history/articles/LandClassification.html>.)
- Lambin, E. F., B. L. Turner, J. G. Helmut, S. B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemands X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. A. Veldkamp, C. Vogel y J. Xu. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11:261-269.
- Lambin, E. F. 1997. Modeling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21(3):375-393.
- LGEEPA. 2003. Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Gobierno de la República Mexicana. 68 p. Disponible en: <http://www.cddhcu.gob.mx/leyinfo/pdf/148.pdf>.
- López, E. M. E. Mendoza y A. Acosta. 2002. Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo, Michoacán. *Gaceta ecológica* 64:19-34.
- LXVII Legislatura-UMSNH. 1996. I Foro de análisis de la Problemática Ambiental del Estado de Michoacán. Cuenca del Lago de Cuitzeo, México.
- Malczewski J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning* 62(1): 3-65.
- . 1999. Spatial Multicriteria decision Analysis. En: J. C. Thill (ed). *Spatial Multicriteria decision Making and Analysis, A Geographical Information Science Approach*. Ashgate, Hampshire, 377 pp.
- Mas J. F., A. Velázquez, J. L. Palacio-Prieto y G. Bocco. 2003. Cartographie et Inventaire Forestier au Mexique. *Bois et Forêts des Tropiques* (275):5-16.
- Mattheus, K. B., A. R. Sibbald y S. Craw. 1999. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating geographic information system and environmental models with search and optimization algorithms; *Computers and Electronics in Agriculture* 23:9-26.
- Meijerink, A. J. M., 1988. *Data acquisition and data capture through terrain mapping units*. ITC Publication No. 7. Enschede, Holanda, 23-44.
- Mendoza M., E., López, E. y G. Bocco. 2001. Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial. Informe final presentado al Programa SIMORELOS-





- CONACyT. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, 266 pp.
- Mendoza, M.E. y G. Bocco, 1998. El relieve y las políticas de uso de suelo: el caso de la costa sur de Sonora. *Jaina* 9(4):2-3.
- Mendoza, M. E., 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo. Tesis Doctorado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 198 pp.
- Naveh, Z. 2000. What is holistic landscape ecology? A conceptual introduction. *Landscape and Urban Planning* 50:7-26 pp.
- y A. S. Lieberman. 1993. *Landscape ecology, theory and application*. Springer Verlag, Nueva York.
- Noy-Meir, Y. 1973. Data transformation in ecological ordinations. I. Some advantages of non-centering. *Journal of Ecology* 61: 736-760.
- O'Connor, R., T. Renault, C. Floch, T. Moynihan ty A. Combelles. 1997. Prompter-A decision Support Tool using Distributed Intelligent Agents; Proceedings of EXPERTSYS97.
- Palacio, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna, G. Gómez, J. López, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga y F. González. 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del inventario forestal nacional 2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 43:183-203.
- Pereira J. M. C. y L. Duckstein. 1993. A multiple decision making approach to GIS-based and land suitability evaluation. *International Journal of Geographical Information Systems* 7: 407-424.
- Pielou, E. C. 1984. *The interpretation of ecological data: a primer on classification and ordination*. John Wiley and Sons, Nueva York.
- Ponce-Hernández, R. 1984. Land inventory and traditional agro-technology information as basis for the mapping of land management units in central Mexico. En: W. Siderius (ed.). 1986. *Land evaluation for land-use planning and conservation in slopping areas*. ILRI publication 40. Wageningen, Holanda.
- Power, D. J. 2003. *A Brief History of decision Support Systems*. Disponible en: <http://ds-sresources.com/history/dsshhistory.html>.
- Pulido, J., Pérez J. y S. Martínez. 2001. Evaluación de tierras para fines Agrícolas y Forestales. En: M. E. Mendoza, E. López-Granados y G. Bocco. Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial, Informe Final presentado al Programa SIMORELOS-CONACyT. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, 266 pp.





- Pulido, S., J., J. Romero Peñaloza y M. Núñez V. 1995. *La producción agropecuaria y forestal de la región Sierra Purépecha, Michoacán*. Centro Regional Universitario de Occidente. Universidad Autónoma Chapingo, Morelia, Mich.
- Puyravaud, J. P. 2002. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 6060:1-4.
- Real Academia Española (RAE); 2001; Diccionario de la Lengua Española. 22 edición. Disponible en: <http://www.rae.es>; Consultada entre mayo y julio de 2004.
- Robbins, P. 2003. Beyond Ground Truth: GIS and the Environmental Knowledge of Herders, Professional Foresters, and Other Traditional Communities. *Human Ecology* 3:2:233-253.
- Rodríguez, O. 1995. *Land use conflicts and planning strategies in urban fringes. A case study of western Caracas, Venezuela*. ITC Publication, No. 27. Enschede, Holanda, 266 pp.
- Romero Peñaloza, J., J. Andrés Agustín, G. Arteaga López, M. Blancarte Díaz, H. Calderón Amador, V. López Prado, D. Rivera Moctezuma, S. Rivera Moctezuma y C. Santos Cervantes. 1994. *La producción agropecuaria de la región Valle del Tepalcatepec, Michoacán*. Centro Regional Universitario de Occidente. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Rosenblueth, E. 2004. *Escritos selectos*. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 496 pp.
- Rosete, F. y G. Bocco. 1999. Ordenamiento territorial. Bases conceptuales y estrategias de aplicación en México. *Geografía Agrícola. Estudios regionales de la agricultura mexicana* 28:21-39.
- Rosete, F. 1998. Diseño de base de datos para su aplicación en la Evaluación de Tierras de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Tesis M.C. Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich.
- Rossiter, D. 1996. A theoretical framework for land evaluation. *Geoderma* 72:165-202.
- Rossiter, D. G. y Van Wambeke, A. R. 1997. Automated Land Evaluation System (ALES) Version 4.65 User's Manual. Ithaca, Nueva York, Cornell University, Department of Soil, Crop & Atmospheric Sciences. SCAS Teaching Series No. T93-2 Revision 6, 284 pp.
- Rossiter, D. G. 1996. A theoretical framework for land evaluation (with Discussion) *Geoderma* 72:165-202.
- Rossiter, D. V. 1990. ALES: a framework for land evaluation using a microcomputer. *Soil, Use and Management* 6(1): 7-20.
- Rounsevell, M. D. A., J. E. Annetts, E. Audsley, T. Mayr y I. Reginster. 2003. Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95:465-479.





- Ruiz Corral, J. A., G. Medina García, I. Julieta González Acuña, C. Ortiz Trejo, H. E. Flores López, R. Martínez Parra y K. Francisco Byerly Murphy. 1999. *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. INIFAP-SARH, México.
- Rzedowski, J. 1988. *Vegetación de México*. Editorial Limusa, México, 432 pp.
- Saaty, T. L. 1994. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces* 24(6): 91-98.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Manual de regionalización ecológica*. SEDUE, México.
- Sharifi, A. y M. Herwijnen. 2003. *Spatial decision Support Systems*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, 200 pp.
- Sheng, T. C. 1992. *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas*. Guía FAO Conservación 13/6. FAO, Roma.
- Simon H. A. 1960. *The science of management decision*. Harper & Row, Nueva York.
- Smith, C. L., B. S. Steel, P. C. List y S. Codray. 1995. Making forest policy integrating GIS with social processes. *Journal of Forestry* 93:31-36.
- SMN. 2005. Normales climatológicas estándar y provisionales 1961-1990 de las estaciones de la cuenca del río Tepalcatepec. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx>. Consultada en julio de 2005.
- SPP. 1981. *Guías para la interpretación de cartografía. Uso Potencial del Suelo*. Secretaría de Programación y Presupuesto, México 52 pp.
- Steiner, F., R. Dunford y N. Dodsall. 1987. The use of the agricultural land evaluation and site assessment system in the united states. *Landscape and Urban Planning* 14:183-199.
- Thill, J. C. (ed.). 1999. *Multicriteria Decision-making and Analysis: A Geographic Information Sciences Approach*. Ashgate, Nueva York.
- Thomas, M. R. 2002. A GIS-based decision support system for Brownfield redevelopment. *Landscape and Urban Planning* 58:7-23.
- Thornett, A. M. 2001. Computer decision support systems in general practice. *International Journal of Information Management* 21:39-47.
- Tricart, J. y C. KiewietdeJonge. 1992. *Ecogeography and Rural Management*. Longman Scientific and Technical, Essex, 267 pp.
- Tricart, J. y J. Killian. 1982. *La ecogeografía y la ordenación del medio*. Anagrama, Barcelona, 287 pp.
- Troll, C. 1971. Landscape Ecology (Geoecology) and Biocenology – A Terminological Study. *Geoforum* 8:43-46.
- UMSNH. 2001. Taller de Consenso sobre la problemática del lago de Cuitzeo.





- Valenzuela, C. R. 2002. Diagnóstico de las tierras en la vertiente sur del Parque Nacional del Tunari. Elaborado para la prefectura del Departamento de Cochabamba, Bolivia.
- Valenzuela, C. 1991. *Introduction to Geographical Information Systems*. ITC, Enschede, Holanda, 212 pp.
- Van Zuidam, R. y F. I. Van Zuidam-Cancelado. 1979. *Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs*. ITC Books VII-6; Enschede, Holanda, 309 pp.
- Velázquez A y G. Bocco. 2003. La ecología del paisaje y su potencial para acciones de conservación de ecosistemas templados de montaña; En: Ó. Sánchez, E. Vega, O. Monroy-Vilchis y C. Dominguez Aguilar (eds.). 2003. *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. Instituto Nacional de Ecología, México, 315 pp.
- Velázquez, A. 1993. *Landscape Ecology of Tlálloc and Pelado volcanoes*, Mexico. ITC Publications, Enschede, Nr. 16, pp 152.
- Velázquez, A., E. Duran, I. Ramírez, J. F. Mas, G. Ramírez, G. Bocco y J. L. Palacio. Environmental conversion processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, Mexico. *Global Environmental Change* 3(12):8-24.
- Velázquez, A., G. Bocco y A. Torres. 2001. Turning scientific approaches into practical conservation actions: the case of Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, México. *Environmental Management* 5:216-231.
- Velázquez, A., J. F. Mas, R. Mayorga-Saucedo, J. L. Palacio, G. Bocco, G. Gómez-Rodríguez, L. Luna-González, I. Trejo, J. López-García, M. Palma, A. Peralta y J. Prado-Molina, y F. González-Medrano. 2001. El inventario forestal nacional 2000. Potencial de usos y alcances. *Ciencias* 64:13-19.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz, R. Mayorga, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica* 62: 21-37.
- Verstappen, H. Th. y R. Van Zuidam (1991). *The ITC System of Geomorphologic Survey. A basis for the evaluation on natural resources and hazards*. ITC publication No. 10. Enschede, Holanda, 89 pp.
- Voogd, H. 1983. *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. Pion, Ltd., Londres.
- Wilson, R. D. 1994. GIS & decision support systems, *Journal of Systems Management* 45(11):36-40.
- Young, A. 1976. *Tropical soils and soil survey*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zinck, J. A., 1988. *Physiography and Soils. Soil Survey Course*. ITC, Enschede, Holanda.
- Zonneveld, I. S., 1995. *Land Ecology*. Academic Publishing, Amsterdam, 199 pp.
- . 1979. *Land Evaluation and Land(Scape) Science*. Lectures of Land(Scape) Science; Land(Scape) Survey and Land Evaluation (Pragmatic Land Classification). Textbook VII.4. ITC. Enschede, Holanda, 134 pp.







Análisis de la aptitud territorial.

Una perspectiva biofísica,

de Manuel Mendoza, Héctor Plascencia,
Pedro Camilo Alcántara, Fernando Rosete
y Gerardo Bocco se terminó de imprimir
y encuadernar en los talleres de Impresora
y Encuadernadora Progreso, S.A. de C.V. (IEPSA),
Calzada de San Lorenzo 244, 09830, México, D.F.
durante el mes de octubre de 2010

Se tiraron 300 ejemplares



