



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TECNICAS DE DECISION PARA LA PLANEACION EN AREAS NATURALES PROTEGIDAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
B I O L O G A
P R E S E N T A :
LILIANA GUTIERREZ MARISCAL



DIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS ANTONIO BOJORQUEZ TAPIA

MEXICO, D. F.

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias.
PRESENTE

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de tesis que lleva el título:

Técnicas de decisión para la planeación en Áreas Naturales Protegidas
realizado por : GUTIÉRREZ MARISCAL LILIANA

con número de cuenta 8900166-0, pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

Dr. Luis Antonio Bojórquez Tapia

Propietario

Dr. Jorge Arturo Meave del Castillo

Propietario

M. en C. Irene Pisanty Baruch

Suplente

M. en C. Salvador Sánchez Colón

Suplente

Dr. Gerardo Ceballos González

Consejo Departamental de Biología

Dra. Edna María Suárez Díaz
Coordinadora

Si buscas respuestas, búscalas entre abuelos que beben té
y biólogos que persiguen tejones...

B.Ayala

Y sal ahí a defender el pan y la alegría,
y sal ahí para que sepan, que esta boca es mía...
J.Sabina

DEDICATORIAS

A Gabo,
eras sí pero ahora sueñas un poco a mí, era sí pero ahora vengo un poco de ti...

A Gina y a Pedro,
siempre cerquita, siempre con sonrisas, siempre con amor...

A Mariana,
que llega con flores...

A la Jefita,
La Mujer...

A Valeria,
el milagro de la vida...

A todos los que saben que tengo un Primo que es todo un maestro....
y a mi Primo, por supuesto!

A la UNAM.

AGRADECIMIENTOS

Es muy raro empezar con el final...

En primer lugar gracias a Gina y a Pedro por ser un ejemplo de lucha, de rebeldía, de honestidad y de amor, los adoro. Gracias a Mariana por hacerme reír y porque siempre tuvo a la mano flores y esperanza, a Gabo por coincidir y acompañarme en todos mis sueños, dormida y despierta, te amo.

Gracias a las noches en la Cueva del Oso y en Tuxpan: a Mari, a Rebe, a la Flaca, al Oso, al Güero, a Tuchick y a Rolando que se perdieron conmigo en la noche...

Gracias a la Fac. a sus florecitas, a sus abejorros y a la canción de los buenos borrachos: Bárbara (que entiende los absurdos), Luis (que es un maestro), Isabel y Juan (el milagro del abecedario), Lorenza (y su sistema nervioso autónomo), Tamara (que cree en el hombre), Enrico (que nos sorprende), Carlos (que toca límites), Argelia y Javier (compadritos del sur), Christian (que es sincero consigo mismo), Paloma (que no se despierta si no estornuda), Nacho (y sus atarjeas), Nicolás (que es casi una florecita), Pablo (que devuelve las instalaciones y quiere ser biólogo), Emilio (que es el Rey!), Tathali y Santiago (a sus pantalones y a sus bicicletas).

Gracias a mi abuela y a sus historias..., a Adriana Ayala y a Catherine por enseñarme a amar a la Biología.....a los magos y a su arte: Ricardo, Juan Sebastián, Pedro Manuel y Ana Cecilia, al equipo de bandidos Daniela, Sergio, Rosi y Mikis, a mi segunda madre: Rossana y al Maistro Tonio, a los tlacuaches: Emilio, Omar, Santiago, y Goyo por rescatarme.

Uf! ya casi acabo, gracias a la ayuda y apoyo de Luis Bojórquez (oh capitán, my capitán!) quien siempre estuvo cerca para orientarme, a su infinita paciencia y a su ternura. Los comentarios de Irene Pisanty, Jorge Meave, Salvador Sánchez y Gerardo Ceballos sirvieron para enriquecer las ideas aquí presentadas, a todos ellos mil gracias por su colaboración incondicional. Gracias a mis amigos del Lab. Jo, George, Bunny, Luli, Salo y Rodri, por las desveladas, las batallas ganadas y sobre todo por su cariño. Gracias a Roberto Uribe por pelearse con las computadoras por mí.

RESUMEN

Las técnicas de la teoría de decisión pueden aplicarse para la solución de problemas de planeación ambiental, éstas permiten la incorporación de información biológica así como de la percepción de los sectores sociales. En particular, pueden ser usadas en la planeación en Areas Naturales Protegidas (ANPs). En este trabajo la utilización de estas técnicas permitió la generación de un índice de valor para la bioconservación de las ANPs del Distrito Federal y de mapas de grupos de aptitud, como resultado de un análisis de aptitud, para dos de ellas en particular: Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra Santa Catarina. El índice de valor para la bioconservación permitió establecer prioridades en cuanto a la protección de áreas importantes para la bioconservación y el análisis de aptitud, integrado a un sistema de información geográfica (SIG), derivó en un patrón de uso de suelo que minimiza el conflicto y maximiza el consenso entre los sectores involucrados. Los resultados de dichos análisis constituyen estrategias de manejo explícitas que pueden ser utilizadas, directamente, por los tomadores de decisiones.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	1
II.- MARCO TEÓRICO	5
II.1 Teoría de decisión en bioconservación	5
II.2 Análisis espacial	8
III.- SISTEMA DE ESTUDIO	12
IV.- MÉTODOS	15
IV.1 Índice de valor para la bioconservación	15
IV.1.1 Elaboración de la reglas de decisión	15
IV.1.2 Integración de la Información	17
IV.2 Esquema de planeación ambiental	18
IV.2.1 Elaboración de las reglas de decisión	19
IV.2.2 Integración de la Información	19
IV.2.3 Análisis de Aptitud	20
V.- RESULTADOS	21
V.1 Índice de valor para la bioconservación	21
V.1.1 Importancia de los criterios	21
V.1.2 Descripción de las áreas naturales protegidas	21
V.1.3 Combinación lineal ponderada	24
V.2 Esquema de planeación ambiental	32
V.2.1 Parque Ecológico de la Ciudad de México	32
V.2.2 Sierra Santa Catarina	34
VI.- DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	54
VII.- LITERATURA CITADA	60
ANEXO 1.	66
ANEXO 2.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Áreas Naturales del Distrito Federal -----	14
Figura 5.1: Grupos de Aptitud en el Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	50
Figura 5.2: Residuales de Gower para las actividades del Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	51
Figura 5.3: Grupos de Aptitud en la Sierra Santa Catarina -----	52
Figura 5.4: Residuales de Gower para las actividades de la Sierra Santa Catarina -----	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Ubicación por delegación política del Distrito Federal y categoría de manejo por Área Natural Protegida del Distrito Federal -----	13
Tabla 5.1: Valores de importancia del AHP por criterio -----	24
Tabla 5.2: Extensiones de los tipos de vegetación natural por Área Natural Protegida -----	25
Tabla 5.3: Número estimado de especies de vertebrados terrestres por Área Natural Protegida del Distrito Federal -----	26
Tabla 5.4: Número estimado de especies endémicas de vertebrados terrestres por Área Natural Protegida del Distrito Federal -----	26
Tabla 5.5 Número estimado de especies de vertebrados terrestres en riesgo por Área Natural Protegida del Distrito Federal -----	26
Tabla 5.6 Distancias promedio a vías de comunicación y suelo con ocupación urbana por Área Natural Protegida del Distrito Federal -----	27
Tabla 5.7 Valor de importancia hídrica por área (ha), factores de ponderación e importancia hídrica final por Área Natural Protegida del Distrito Federal ----	27
Tabla 5.8 Matriz de valores de los criterios por Área Natural Protegida -----	28
Tabla 5.9 Matriz de valores estandarizados (valores de utilidad) de los criterios por Área Natural Protegida -----	28
Tabla 5.10 Funciones de utilidad por criterio; y representa el valor de utilidad y x es el valor del criterio para cada Área Natural Protegida -----	29
Tabla 5.11 Matriz con los resultados de la Combinación Lineal Ponderada del peso por el valor estandarizado de los criterios en cada Área Natural Protegida -----	30
Tabla 5.12 Valores del índice de contribución a la conservación de los recursos naturales del Distrito Federal por Área Natural Protegida -----	31
Tabla 5.13 Actividades seleccionadas en el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina -----	36

Tabla 5.14 Definición de las actividades para el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina -----	37
Tabla 5.15 Lista de variables para el análisis de aptitud del Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	38
Tabla 5.16 Jerarquía de variables por actividad en el Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	39
Tabla 5.17 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud para las actividades del Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	40
Tabla 5.18 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad de educación ambiental y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México ---	41
Tabla 5.19 Superficie ocupada (ha) por grupo de aptitud y tipo de vegetación y usos del suelo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	42
Tabla 5.20 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad manejo de recursos naturales y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	43
Tabla 5.21 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad protección especial y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	43
Tabla 5.22 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad uso público y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México -----	43
Tabla 5.23 Lista de variables para el análisis de aptitud de la Sierra Santa Catarina ----	44
Tabla 5.24 Jerarquía de variables por actividad en la Sierra Santa Catarina -----	45
Tabla 5.25 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud para las actividades de la Sierra Santa Catarina -----	46
Tabla 5.26 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad uso público tipo A y por grupo en la Sierra Santa Catarina -----	47
Tabla 5.27 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad recuperación ambiental y por grupo en la Sierra Santa Catarina -----	47
Tabla 5.28 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad manejo de recursos naturales y por grupo en la Sierra Santa Catarina -----	47

Tabla 5.29 Superficie ocupada (ha) por grupo de aptitud y tipo de vegetación y usos del suelo en la Sierra Santa Catarina	48
Tabla 5.30 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad uso público tipo B y por grupo en la Sierra Santa Catarina	49
Tabla 5.31 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad educación ambiental y por grupo en la Sierra Santa Catarina	49

I. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra es actualmente un lugar completamente diferente al que fue hace 100 años. Cada ecosistema natural en el planeta ha sido alterado por la humanidad, algunos hasta el punto del colapso (Meffe y Carroll, 1997). Es durante la década de los ochenta que el reconocimiento del carácter mundial de problemas como el calentamiento global, la contaminación, la explosión demográfica y la extinción de especies lleva a la búsqueda e instrumentación de estrategias de desarrollo dirigidas al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la preservación de la biodiversidad (Lucas, 1992).

Una de las repercusiones negativas del crecimiento de la población humana y de la expansión de las actividades económicas es el colapso de la diversidad biológica debido a la reducción y fragmentación de los hábitats naturales (Bojórquez-Tapia et al., 1990; Loomis, 1993; Meffe y Carroll, 1997). Entre los mecanismos para la protección de especies y sus hábitats se encuentra la creación de áreas legalmente protegidas. Éstas se establecen con el propósito de mantener a la naturaleza libre de la explotación humana excesiva; por tanto, resultan vitales para la protección de la diversidad biológica como fuente de desarrollo y del bienestar humano y, como elementos de valor intrínseco (Lucas, 1992). La degradación de la naturaleza no sólo tiene consecuencias biológicas, sino que sus repercusiones son también de carácter económico pues las posibilidades del desarrollo se estrechan (Carabias et al., 1990).

En México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental de 1999 (LGEEPA) estipula las definiciones, los objetivos y los medios para lograr el uso racional de los recursos naturales y la preservación de ecosistemas prístinos. Las Áreas Naturales Protegidas (ANPs) se encuentran reguladas por esta ley, y en la actualidad, existen 117 en todo el país.

Desgraciadamente, existen casos en que áreas protegidas se están convirtiendo en "islas

de naturaleza” rodeadas por un “mar de desarrollo” (Lucas, 1992). En algunos países los recursos naturales de dichas áreas están siendo devastados por presiones externas que buscan beneficiarse de la explotación de dichos recursos. Así, se ha mencionado que si los esfuerzos conservacionistas de un país se dirigen a la protección exclusiva de un área, entonces la conservación a nivel regional tiende al fracaso y tanto la diversidad biológica como la cultural se ven afectadas (Lucas, 1992). En este sentido, una estrategia efectiva en cuanto a conservación deberá integrar a los objetivos conservacionistas con los objetivos de las actividades productivas en programas coherentes de planeación de uso de suelo (Gilbert, 1979; Conacher, 1980).

Un análisis de aptitud es una herramienta de planeación para el diseño de un patrón de uso de suelo que evite la aparición de conflictos ambientales a través de la segregación de usos que compiten por espacios (Eastman et al., 1993). Así, es una técnica que apoya al proceso de toma de decisiones en el marco del manejo integral de recursos naturales, el cual ha sido definido por Loomis (1993) como la organización de los diferentes usos humanos de los recursos naturales, de manera tal que se obtenga el mayor valor de bienes y servicios de estos recursos en un determinado tiempo. En este marco, las actividades productivas humanas deben orientarse al uso más eficiente de los recursos naturales, atenuar posibles impactos y restaurar los deterioros (Carabias y Provencio, 1992)

Cuando un análisis de aptitud se integra a un sistema de información geográfica (SIG) es posible establecer un patrón de uso de suelo que minimice el conflicto y maximice el consenso entre los actores involucrados (Eastman et al., 1993; Malczewski et al., 1997). Lo anterior depende de cómo sean integradas las actividades y las interacciones de los grupos de interés (Malczewski et al., 1997), así como de que las reglas de decisión sean elaboradas de modo que los criterios de uso de suelo de estos grupos se satisfagan (Eastman et al., 1993).

Existen tres elementos de decisión de uso de suelo a escala regional: (1) la distribución de la cobertura del suelo, de la población y de las actividades humanas, o infraestructura; (2) las organizaciones sociales, o la estructura social, presentes en la región o estructura, y (3) las ideas, valores y actitudes que la gente tiene sobre los usos particulares de la tierra, o supraestructura (Smith et al., 1995). Los análisis basados en sistemas de información geográfica deben incluir dichos elementos de decisión (Bojórquez-Tapia et al., en prensa).

Por otro lado, es importante analizar cómo se incorpora el conocimiento científico biológico al problema del manejo. En la realidad es común que pasen décadas antes de que los nuevos paradigmas científicos se traduzcan en herramientas útiles para el manejo. Aun en los casos en que estos paradigmas resulten relevantes para el manejo, no siempre son familiares para los encargados de la toma de decisiones que fueron entrenados con anterioridad a su aparición y que requieren de metas concretas que guíen sus decisiones (Pulliam 1997).

Una vez que un área ha sido declarada como protegida es necesario evaluar su contribución a la protección a escala regional. Esto requiere de la identificación y valoración de los atributos físicos y biológicos presentes y de su importancia para la bioconservación (Dixon y Sherman, 1990). La aplicación de conceptos biológicos en el diseño de proyectos, programas y políticas requiere la articulación del conocimiento de los biólogos en una forma útil para los tomadores de decisiones (Ortolano, 1997).

En este trabajo se propone la utilización de un índice de valor para la bioconservación como el elemento que guíe a la planeación en un ANP. En otras palabras, se propone un método de valoración de los atributos biológicos y físicos de un ANP que determine los usos de suelo. En la elaboración de este índice, las técnicas utilizadas, permitieron la integración del conocimiento científico sobre las características biológicas y físicas, que le dan valor para la bioconservación a un área natural protegida, en un marco analítico y

riguroso. El índice de valor para la bioconservación se aplicó en un conjunto de ANPs del Distrito Federal. El análisis de aptitud se realizó para dos de ellas: Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra Santa Catarina.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Teoría de decisión en bioconservación

Un aspecto que complica el proceso de toma de decisiones en bioconservación es la carencia de una base teórica. En efecto, Maguire (1986) señala que las teorías y conceptos ecológicos no han sido generados en un contexto de manejo de recursos naturales o bioconservación. Por consiguiente, una bioconservación más efectiva en la práctica deberá incorporar la combinación de las teorías de la ecología con las herramientas del análisis de sistemas y de la teoría de decisión (Possingham, 1997).

La biología de la conservación ha sido descrita como una disciplina de crisis, donde se tienen que tomar decisiones urgentes, en condiciones de incertidumbre e información limitada y que involucran sistemas complejos (Maguire, 1991). Un sistema se puede definir como un objeto de estudio formado por componentes que interactúan. Un sistema complejo es aquel en el que los componentes presentan un alto grado de interdependencia como ecosistemas naturales o ciudades (Wilson, 1981; Loomis, 1993). Existen tres aspectos en el entendimiento de los sistemas complejos (Wilson, 1981): (1) descripción sistemática de los componentes y sus interrelaciones, (2) identificación del comportamiento del sistema y (3) búsqueda de métodos generales que puedan aplicarse a diferentes sistemas

La mayoría del desarrollo de la teoría de decisión se ha dado en el área de investigación de operaciones y en el manejo de recursos naturales (Dykstra, 1984; Loomis, 1993; Malczewski, 1999) pero ha sido poco desarrollada en problemas de bioconservación. En esta área se ha utilizado para el manejo de especies en peligro (Maguire, 1986), en el diseño óptimo de reservas y la elección de áreas prioritarias para la bioconservación (Bedward et al., 1992; Bojórquez-Tapia et al., en prensa), para la elaboración de estrategias de planeación en reservas (Peterson y Schmoldt, 1994), y en el ordenamiento

ecológico (Bojórquez-Tapia et al., 1997).

En síntesis, la teoría de decisión está diseñada para ayudar en la elección de la mejor opción dentro de un conjunto de opciones (Keeney y Raiffa, 1975). Malczewski (1999) define teoría de decisión como un conjunto de procedimientos sistemáticos que sirven para evaluar problemas de decisión complejos. La estrategia básica consiste en dividir el problema en partes para su análisis de modo que se facilite el alcanzar una solución lógica y coherente. Las técnicas de decisión se han desarrollado con base en tres patrones de lógica: (1) ordenación simple, (2) establecimiento y búsqueda de metas y (3) optimización (Yu, 1940).

De manera general, la teoría de decisión presenta dos líneas de análisis: prescriptivo y descriptivo. Un análisis descriptivo pretende encontrar las razones que guían el proceso de toma de decisiones, por ejemplo investiga las razones del electorado para votar por un candidato en particular (Eastman et al., 1993). Por otro lado, los análisis prescriptivos se centran en el desarrollo, la evaluación y la aplicación de técnicas que faciliten el proceso de toma de decisiones (Eastman et al., 1993). Éstos implican una descomposición del problema *a priori*, es decir, la separación del proceso de decisión en sus componentes antes que la decisión se tome (Edwards y Newman, 1986). Se basan en análisis matemáticos y estadísticos, utilizan los conceptos de utilidad y probabilidad. El primero se relaciona con la expresión de preferencias de entre una serie de opciones alternativas, mientras que el segundo sirve para evaluar la posibilidad de que dichas preferencias se realicen (Eastman et al., 1993).

Tradicionalmente, los análisis prescriptivos consisten en criterios de decisión que son evaluados en forma objetiva o subjetiva. Una evaluación objetiva pretende asignar un valor a las diferentes opciones de decisiones y a sus posibles impactos para identificar la mejor opción. Una evaluación subjetiva incluye diferentes enfoques para expresar juicios consistentes y escoger la mejor opción de manera racional. Las técnicas

utilizadas para estas evaluaciones incluyen el establecimiento de preferencias explícitas. Los parámetros empleados para establecer las preferencias incluyen esquemas de ponderación de criterios de decisión y funciones de utilidad (Eastman et al., 1993).

Uno de los métodos para ponderar criterios de decisión es el AHP. Éste es un método de decisión multicriterio que se emplea para formular problemas de decisión conforme a una estructura jerárquica (Saaty, 1980), ha sido usado en manejo de recursos naturales y planeación ambiental para la solución de conflictos y en evaluaciones ecológicas (Anselin et al. 1989). Se basa en tres principios: (1) descomposición, (2) juicios comparativos, y (3) establecimiento de prioridades. El primero requiere de que el problema de decisión sea desglosado en una jerarquía que capture los elementos esenciales del problema. El segundo requiere la comparación por pares de los elementos de un mismo nivel con respecto a su contribución para lograr la meta, y el tercero se usa para establecer prioridades a partir de los pesos de cada elemento (Malczewski 1999). La utilidad de un criterio se deriva mediante la denominada función de utilidad, ésta incluye dos elementos: (1) la transformación de las escalas naturales de los criterios en una escala de intervalo o utilidad, y (2) la definición de los pesos empleados de importancia relativa de los criterios (Keeney y Raiffa, 1975).

Los problema de decisión se caracterizan por involucrar una serie de criterios, es decir, son multicriterio (Szidarovsky et al., 1986). Esta condición se cumple para los problemas en bioconservación. Según Malczewski (1999), los problemas de decisión multicriterio involucran seis componentes: (1) el objetivo o conjunto de objetivos que se desean alcanzar, (2) el tomador o los tomadores de decisiones, (3) el conjunto de criterios de evaluación (objetivos y/o atributos), (4) el conjunto de alternativas, (5) el conjunto de variables fuera del control del tomador de decisiones y (6) el conjunto de resultados o consecuencias asociadas a cada alternativa.

En cuanto a su clasificación, Malczewski (1999) propone tres niveles de análisis: (1) problemas de decisión multiobjetivo / problemas de decisión multiatributo,

(2) problemas de decisión individuales / problemas de decisión grupales, y
(3) decisiones bajo condiciones de certeza / decisiones bajo condiciones de incertidumbre. Esta clasificación se basa en la definición de criterio de decisión como un término genérico que se aplica para referirse tanto a los atributos como a los objetivos.

Así mismo, Eastman et al.(1993) dividen a los análisis de decisión en multicriterio y multiobjetivo y define al criterio como la base de una elección que puede ser medida y evaluada. Si se sigue esta definición, un problema multiatributo (sensu Malczewski, 1999) se resuelve a través del análisis multicriterio propuesto por Eastman et al. (1993). Un mismo problema puede requerir tanto de un análisis multicriterio como de una multiobjetivo, el segundo implica un problema de optimización (Bojórquez-Tapia y Díaz, en prensa; Szidarovsky et al., 1986).

II.2 Análisis espacial

Un análisis espacial incluye un conjunto de conceptos, técnicas y modelos que proporcionan de un marco formal y cuantitativo a sistemas donde las variables principales varían en el espacio (Longley y Batty, 1996). En cualquier análisis espacial cuatro aspectos resultan fundamentales: (1)obtención de la información, (2)escalas de medición, (3)escala geográfica y (4)integración a un SIG.

Con respecto al primer punto, la información se obtiene directamente en el campo o bien utilizando técnicas de percepción remota. De las dos técnicas, la segunda resulta crítica para la modelación y monitoreo de procesos naturales, y por tanto para el manejo de recursos naturales y la bioconservación. La videografía y fotografía aéreas así como las imágenes de satélite son ejemplos de percepción remota (Jensen, 1996).

Las escalas de medición determinan el conjunto de reglas que se usan para distinguir

una o más de las siguientes relaciones entre dos objetos medibles, A y B , con respecto a una propiedad x : (1) $A(x) = B(x)$, (2) $A(x) \neq B(x)$, (3) $A(x) < B(x)$, (4) $A(x) > B(x)$. Si bien la escala de medición define la relación entre dos objetos, éstos están descritos por conceptos empíricos. El término concepto empírico se utiliza para describir objetos y eventos que se estudian en el mundo real. Se dividen en conceptos clasificatorios, conceptos de orden y conceptos de variable. Los conceptos clasificatorios identifican a los objetos en términos de clases. Los conceptos ordinales involucran la clasificación jerárquica de objetos en términos de un criterio. Los conceptos de variable son aquellos atributos que se pueden cuantificar (Taylor, 1977).

El modo más elemental de medición involucra denotar las diferencias y similitudes entre dos objetos o eventos, este tipo de medidas pertenecen a la escala nominal. Al denotar las diferencias y similitudes es posible convertir conceptos clasificatorios en valores de una escala nominal. Una escala ordinal proporciona información sobre conceptos ordinales y los ubica en una escala jerárquica. Las medidas de intervalo y de razón permiten la transformación directa de conceptos de variable a sistemas numéricos cuantitativos. Tanto en la escala de razón como en la de intervalo, la separación entre objetos se puede cuantificar. La escala de intervalo se distingue de la de razón porque la primera tiene un origen o cero arbitrario (Taylor, 1977).

El término escala geográfica se refiere tanto a la magnitud del estudio como al grado de detalle. La escala geográfica define los límites de nuestras observaciones de la tierra. Cualquier observación de la tierra tiene una dimensión lineal mínima definida como el límite de la resolución espacial y una dimensión lineal máxima que define la extensión geográfica del estudio o colección de datos (Quattrochi y Goodchild, 1997).

La toma de decisiones en bioconservación se dificulta por los diferentes significados de la escala, por ejemplo, en ecología del paisaje la escala representa la medida del tamaño de los parches en un paisaje fragmentado en hábitats discretos, mientras que en cartografía la escala representa la proporción entre la distancia en el mapa y la distancia

real en el campo. Las diferentes definiciones de escalas pueden oscurecer información vital para una correcta decisión, particularmente cuando se debe integrar información proveniente de varias fuentes. Este punto resulta crítico sobre todo en estudios que deben combinar datos de ciencias naturales en unidades políticas. La utilización de SIG ha abierto la posibilidad de obtener representaciones multiescala (Quattrochi, 1997).

El desarrollo de SIGs ha permitido que el proceso de toma de decisiones se base en información actualizada, ya que ha facilitado el acceso y la manipulación de información, de esta manera ha hecho de éste un proceso explícito donde criterios medibles y cuantificables son la base de una decisión (Chuvienco, 1995; Eastman et al., 1993). Un SIG permite almacenar y manipular datos socioeconómicos, físicos y biológicos. Además su uso permite la modelación de éstos datos. El acceso a SIG puede expandir la capacidad de analistas ambientales para el entendimiento del ambiente y la de los tomadores de decisiones para responder a las necesidades de la sociedad (Balstad, 1996).

La información almacenada en un SIG esta referenciada geográficamente sobre un territorio concreto, así es posible relacionar mapas con estadísticas. La información se encuentra almacenada en formato digital. Los SIGs aprovechan la capacidad analítica de las computadoras facilitando operaciones que resultan difícilmente accesibles por métodos convencionales: generalización cartográfica, integración de variables espaciales y análisis de vecindad entre otras (Chuvienco, 1995).

Un problema de decisión integrado a un SIG implica un análisis espacial del problema e involucra una serie de alternativas geográficamente definidas, a partir de las cuales se hace una elección con base en criterios de evaluación (Malczewski, 1999). Los SIGs son una herramienta para el análisis, selección y visualización de estas alternativas (Chuvienco, 1995; Jankowski et al., 1999). El proceso por el que los criterios se combinan se conoce como una regla de decisión. Las reglas de decisión se estructuran

en el contexto de un objetivo que sirve de guía para su formulación (Eastman et al., 1993). En un análisis espacial, las reglas de decisión definen la relación entre los mapas de entrada y el mapa resultante (Malczewski, 1999). Consecuentemente, la combinación de SIGs y técnicas de la teoría de decisión ha sido un desarrollo importante para proveer elementos espaciales de apoyo al manejo de recursos naturales y bioconservación (Jankowski et al., 1999).

III. SISTEMA DE ESTUDIO

En el Distrito Federal existen 89,000 ha (59% de la extensión total) con vegetación natural y áreas agrícolas que forman el Suelo de Conservación (SC). El sistema de estudio comprendió las ANPs del SC con extensiones de vegetación natural. En total abarcó ocho ANPs: (1) Los Bosques de la Cañada de Contreras, (2) Cumbres del Ajusco, (3) Desierto de los Leones, (4) Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, (5) Parque Ecológico de la Ciudad de México, (6) Sierra Guadalupe, (7) Sierra Santa Catarina y (8) El Tepeyac (Figura 3.1). La extensión total de estas ANPs es de, aproximadamente, 5,100 ha, de las cuales el 30% corresponde al Desierto de los Leones; el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Guadalupe abarcan cada una 14%, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Cumbres del Ajusco y Sierra Santa Catarina se extienden, en conjunto, en un 34%, mientras que las más pequeñas son Los Bosques de la Cañada de Contreras y El Tepeyac, con 4% cada una (CORENA, 1999).

La distribución de estas ANPs abarca los sistemas biológicos representativos del SC. Los tipos de vegetación natural en SC incluyen bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de encino, matorral xerófilo, pastizal y zacatonal alpino, y abarcan 50,000 ha, de las cuales 4,600 ha se ubican dentro de las ANPs; todos los tipos de vegetación están representados en las ANPs. Existen 273 especies de vertebrados terrestres reportados para los tipos de vegetación registrados en las ANPs, siendo el bosque de encino el que mayor número de especies alberga (CORENA, 1999).

En términos generales, el SC se localiza en la región sur-surponiente del Distrito Federal, entre los 2,200 y 4000 m snm (Bojórquez-Tapia et al., 2000). El 93% de la extensión del SC se ubica en las serranías que delimitan al Distrito Federal: hacia el sur, la Sierra Chichinautzin y la Sierra del Ajusco; hacia el suroeste, la Sierra de las Cruces; hacia el oriente, la Sierra Santa Catarina; y hacia el norte, la Sierra Guadalupe. El porcentaje

restante se incluye dentro de la zona lacustre de Xochimilco y Tláhuac (CORENA, 1999).

En cuanto a su ubicación, las ANPs se encuentran en las delegaciones políticas Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Tláhuac y Tlalpan (Figura 3.1, Tabla 3.1). Se identificaron tres categorías de manejo en las ANPs: Zona Sujeta a Conservación Ecológica, Parque Nacional y Zona de Protección Forestal (CORENA, 1999; Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Ubicación por delegación política del Distrito Federal y categoría de manejo por Área Natural Protegida del Distrito Federal

Área Natural Protegida	Delegación Política	Categoría de Manejo
Los Bosques de la Cañada de Contreras	Magdalena Contreras	Zona de Protección Forestal
Cumbres del Ajusco	Tlalpan	Parque Nacional
Desierto de los Leones	Cuajimalpa y Álvaro Obregón	Parque Nacional
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	Cuajimalpa	Parque Nacional
Parque Ecológico de la Ciudad de México	Tlalpan	Zona Sujeta a Conservación Ecológica
Sierra Guadalupe	Gustavo A. Madero	Zona Sujeta a Conservación Ecológica
Sierra Santa Catarina	Iztapalapa y Tláhuac	Zona Sujeta a Conservación Ecológica
El Tepeyac	Gustavo A. Madero	Parque Nacional

Figura 3.1 Áreas Naturales Protegidas del Distrito Federal



Figura 3.1 Áreas Naturales Protegidas del Distrito Federal. En gris se muestra el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

IV. MÉTODOS

IV.1 Índice de valor para la bioconservación

El índice de valor para la bioconservación para ANPs del Distrito Federal se elaboró a través de la utilización de técnicas de toma de decisión: el Proceso de Análisis Jerárquico y la Combinación Lineal Ponderada. Éstas se integraron al sistema de información geográfica (SIG) Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) versión 4.2.

IV.1.1 Elaboración de las reglas de decisión

Las reglas de decisión se generaron a partir de una consulta a expertos realizada en el Laboratorio de Análisis Ambientales del Instituto de Ecología, UNAM, bajo la coordinación de Luis Bojórquez. Dicha consulta resultó en ocho criterios de decisión cuya ponderación se obtuvo siguiendo el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), (Malczewski et al., 1997; Anexo 1). Los pesos de importancia de los ocho criterios se calcularon con el programa Expert Choice para Windows 97 (Expert Choice, Inc., 1993).

El índice de valor para la bioconservación se obtuvo mediante una combinación lineal ponderada (Bojórquez et al., 1999) del peso y el valor de los criterios. Así, el valor del índice para cada ANP se representó como:

$$s_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

donde w es el peso del criterio, que se obtiene mediante el AHP, y x es el valor estandarizado del criterio. Cada ANP tiene asociado un valor de s , un valor de w y un

valor de x lo cual está indicado por el subíndice i , a su vez cada criterio tiene un valor asociado de w y de x indicado por el subíndice j .

El valor estandarizado de cada criterio se obtuvo mediante la generación de las funciones de utilidad $Uf(\cdot)$ (Keeney y Raiffa, 1975). Los criterios considerados fueron: (1)endemismo, (2)especies bajo alguna categoría de riesgo, (3)extensión, (4)heterogeneidad ambiental, (5)naturalidad, (6)representatividad, (7)riqueza de especies y (8)servicios ambientales.

El tipo de vegetación se utilizó como indicador indirecto de la presencia, al menos potencial, de las especies endémicas de México, de las especies bajo alguna categoría de riesgo y de la riqueza de especies de vertebrados terrestres reportadas en la lista de especies de vertebrados terrestres de la CORENA. Las categorías de vegetación usadas en este trabajo fueron: (1)bosque de encino, (2)matorral xerófilo, (3)bosque de oyamel, (4)pastizal, (5)bosque de pino, (6)vegetación de cañada y (7)zacatonal alpino. El valor para los criterios riqueza de especies, endemismo y especies en alguna categoría de riesgo se obtuvo con la proporción del número de especies, del número de especies endémicas y del número de especies en alguna categoría de riesgo, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994 (SEDESOL 1994), en cada ANP con respecto al total de cada categoría presentes en el SC.

La extensión estuvo representada por el número total de hectáreas decretadas oficialmente como ANP. La heterogeneidad ambiental en cada ANP se calculó con la función de Shannon-Wiener (Krebs, 1994):

$$H = -\sum(p_{\theta}) (\ln p_{\theta}),$$

donde p_{ij} es la proporción de la extensión de cada tipo de vegetación al interior del ANP con respecto a la extensión total del ANP. La naturalidad se evaluó calculando la distancia promedio entre cada ANP, las vías de comunicación principales (carreteras pavimentadas, ejes viales, avenidas y calles) y los asentamientos humanos. Para calcular estas distancias se generó un mapa binario de vías de comunicación principales y asentamientos humanos. Con la instrucción `r.buffer` se delimitaron distancias correspondientes a los siguientes valores: 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 y 5000 m alrededor de los asentamientos humanos y las vías de comunicación. A través de la instrucción `r.average` se combinaron el mapa de distancias y el mapa de ANPs para obtener la distancia promedio a vías principales de comunicación y asentamientos humanos a cada ANP.

El valor de representatividad se obtuvo con el cociente del número de tipos de vegetación por ANP y el número de tipos de vegetación que existen en el SC. El criterio de servicios ambientales fue evaluado con los datos incluidos en el mapa de excedente hídrico del SC. Este mapa incluyó cuatro categorías de importancia hídrica, es decir, a la cantidad de agua disponible para infiltrarse al acuífero: (1)baja, (2)moderada, (3)alta y (4)muy alta. Debido a que existieron ANPs que presentaron dos y tres categorías de importancia hídrica se consideró la extensión de cada categoría dentro de un ANP para asignar el valor final de importancia hídrica. El valor de ponderación correspondió a la proporción de la extensión de cada categoría de importancia hídrica con respecto del total del ANP.

IV.1.2 Integración de información

Las capas de información el Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra Santa

Catarina utilizadas para este estudio incluyeron datos geográficos del Distrito Federal y abarcaron los siguientes temas: (1) Vegetación y uso de suelo, (2) Vías de comunicación principales, (3) Áreas naturales protegidas, y (4) Excedente hídrico.

Estas capas de información formaron parte de la base de datos de la Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal (CORENA) que se generó como parte de la elaboración del Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal y se presentaron en formato raster. La integración de las capas de información a un SIG permitió la manipulación (sobreposiciones de mapas y cálculos de áreas), despliegue y generación de datos (mapas y reportes).

En cuanto a la información biológica, se usó la lista de especies de vertebrados terrestres correspondiente al Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal de la CORENA. Para la consulta y la manipulación de esta información se utilizó el programa EXCEL para Windows 97.

IV.2 Esquema de planeación ambiental

Para evaluar las implicaciones que tuvieron los resultados del índice de valor para la bioconservación en un esquema de planeación ambiental, se llevó a cabo un análisis de aptitud a través del método propuesto por Bojórquez-Tapia et al. (1994), modificado para su integración al SIG (Anexo 2). Se tomaron dos casos de estudio contrastantes por sus calificaciones del índice de valor para la bioconservación: Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra Santa Catarina. Para la generación de las capas de información y los análisis espaciales se utilizó el SIG GRASS versión 4.2.

IV.2.1. Elaboración de las reglas de decisión

Las reglas de decisión se elaboraron en un taller de planeación participativa que incluyó la opinión de autoridades de la CORENA, encargados de la administración y el manejo de las dos ANPs y expertos en el área socioeconómica. Éstos realizaron la identificación de los atributos ambientales críticos para la realización de las distintas actividades que a su juicio se debían llevar a cabo en ambas ANPs. Durante este ejercicio se definieron también los pesos de importancia de las variables ambientales por actividad. Con base en esta información se definieron seis variables ambientales, o criterios de decisión, así como sus estados favorables y desfavorables.

La asignación de las actividades se hizo con base en los resultados del índice de valor para la bioconservación, es decir, tomando en cuenta la contribución del el Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra Santa Catarina la bioconservación en el Distrito Federal, se modificaron las actividades propuestas en el taller de planeación participativa y se definieron las actividades finales que se consideraron en el análisis de aptitud.

IV.2.2 Integración de la información

La base de datos estuvo integrada por las siguientes capas de información: (1) Vegetación y Uso de Suelo, (2) Pendiente, (3) Topografía, (4) Pérdida de suelo, y (5) Altitud. Estas capas de información se presentaron en formato raster. Como en el caso del índice de valor para la bioconservación, su integración a un SIG permitió la manipulación, despliegue y generación de datos.

Estos mapas formaron parte de la base de datos de la CORENA que se generó como parte de la elaboración de los Programas de Manejo del Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina.

IV.2.3 Análisis de Aptitud

Una vez establecidas las actividades en cada ANP, se generaron los mapas binarios que mostraron la presencia del estado favorable de un atributo ambiental para una actividad. A continuación se multiplicaron los mapas binarios por el peso de importancia asignado a cada variable ambiental. Al combinar los mapas binarios ponderados para cada atributo ambiental por actividad, se obtuvieron mapas ordinales de aptitud para cada actividad.

Los mapas de aptitud por actividad fueron clasificados para identificar áreas con valores similares de aptitud. Esta clasificación se obtuvo con la aplicación de un análisis de componentes principales (ACP) que se aplicó de manera secuencial hasta obtener el número de grupos homogéneos con la menor varianza total (Bojórquez-Tapia y Díaz, prensa; Bojórquez-Tapia et al., 1997). Con el fin de analizar la aptitud relativa entre y dentro de los grupos, se obtuvo la aptitud promedio por actividad para cada grupo; con estos resultados se estimaron los residuales de Gower (Gower, 1966).

Finalmente, se identificaron los sitios en donde se pudieran localizar conflictos ambientales. Se definió que éstos surgían cuando las aptitudes de dos o más actividades incompatibles dentro de un mismo sitio eran altas (Bojórquez-Tapia et al., 1997).

V. RESULTADOS

V.1 Índice de valor para la bioconservación

V.1.1 Importancia de los criterios

De los criterios seleccionados, la representatividad y la naturalidad resultaron los más importantes con valores de ponderación similares. Les siguieron en orden de importancia la extensión, el endemismo, las especies en riesgo, los servicios ambientales, la riqueza y en último lugar, la heterogeneidad ambiental (Tabla 5.1).

V.1.2 Descripción de las Áreas Naturales Protegidas (ANPs)

De acuerdo con los criterios utilizados, el tipo de vegetación mejor representado en las ANPs fue el matorral xerófilo, ya que el 72% de su extensión en el SC se encuentra en ANPs. En diferente situación se encontraron la vegetación de cañada, el bosque de pino y el pastizal, ya que sólo 14%, 8% y 1%, respectivamente, de sus extensiones en el SC se encontraron bajo la categoría de ANP. En valores intermedios (del 20 al 37%) se colocaron el zacatonal alpino, el bosque de encino y el bosque de oyamel (Tabla 5.2).

El ANP con mayor extensión de vegetación natural es el Desierto de los Leones con 1.7% del SC. Por el contrario la vegetación natural de El Tepeyac sólo representa el 0.05% del SC. La Sierra de Guadalupe se ubica en segundo lugar con un 0.76%, el Parque Ecológico de la Ciudad de México y el Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla abarcan el 0.71% cada uno. Cumbres del Ajusco, Los Bosques de la Cañada de Contreras y La Sierra Santa Catarina presentan 0.57%, 0.32% y 0.29% respectivamente (Tabla 5.2).

En las ANPs del Distrito Federal se encontraron representados los siete tipos de vegetación del SC (Tabla 5.2), en Insurgente Miguel Hidalgo, Desierto de los Leones y Los Bosques de la Cañada de Contreras predominó el bosque de oyamel. El matorral xerófilo fue, por su extensión, el tipo de vegetación más importante en la Sierra Santa Catarina y el pastizal en Cumbres del Ajusco. Los tipos de vegetación en la Sierra Guadalupe y El Tepeyac ocuparon porcentajes similares de la extensión total. En el Parque Ecológico de la Ciudad de México el tipo de vegetación mejor representado fue el bosque de encino con 50%, seguido de matorral xerófilo con 33%, bosque de pino y zacatonal alpino con 15% y 2% respectivamente (Tabla 5.2).

En cuanto al estado de los vertebrados terrestres en las ANPs del Distrito Federal las estimaciones realizadas indicaron que el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra de Guadalupe presentarían los porcentajes más altos de riqueza de especies (98% y 93% del total de especies de vertebrados terrestres reportadas para el SC respectivamente). Cumbres del Ajusco, Desierto de los Leones e Insurgente Miguel Hidalgo concentrarían en su extensión de vegetación natural al 86% de las especies registradas para el SC, Los Bosques de la Cañada de Contreras presentarían al 63% de la riqueza de vertebrados terrestres del SC, mientras que Sierra Santa Catarina y El Tepeyac resultarían los más pobres, con sólo el 25% de las especies de las especies de vertebrados terrestres reportadas para el SC (Tabla 5.3).

De las especies endémicas, las aproximaciones realizadas mostraron que el 100% de éstas pueden encontrarse en el Parque Ecológico de la Ciudad de México. Porcentajes altos (entre 92% y 94%) le corresponden a Cumbres del Ajusco, Desierto de los Leones, Insurgente Miguel Hidalgo y Sierra Guadalupe. Los Bosques de la Cañada de Contreras podrían concentrar aproximadamente a la mitad de las especies endémicas, mientras que la Sierra Santa Catarina y El Tepeyac sólo presentaría al 2% (Tabla 5.4).

En el caso de las especies en riesgo, los resultados indicaron que el 100% de éstas pueden presentarse tanto en el Parque Ecológico de la Ciudad de México como en la

Sierra Guadalupe. Un porcentaje alto (91%) se ubicaría en Cumbres del Ajusco, Desierto de los Leones e Insurgente Miguel Hidalgo. Finalmente, la mitad de las especies en esta categoría se registraría en Los Bosques de la Cañada de Contreras (Tabla 5.5).

El cálculo de las distancias promedio a vías de comunicación y suelo con ocupación urbana mostró que las ANPs más alejadas fueron Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla y Sierra Guadalupe con un valor de más de 1000 m de distancia promedio. Por arriba de los 700 m se ubicó el Parque Ecológico de la Ciudad de México. Entre 300 m y 500 m se colocaron Los Bosques de la Cañada de Contreras, Desierto de los Leones, Cumbres del Ajusco y Sierra Santa Catarina. En último lugar, y por debajo de los 250 m se ubicó El Tepeyac (Tabla 5.6).

Finalmente, en cuanto a Servicios Ambientales, es decir, importancia para la recarga del acuífero, las ANPs que se consideraron fueron: Desierto de los Leones, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Cumbres del Ajusco, Los Bosques de la Cañada de Contreras y el Parque Ecológico de la Ciudad de México, en orden de importancia (Tabla 5.7). Las restantes se ubicaron en el área de déficit hídrico.

El cálculo del valor estandarizado de los criterios (Tablas 5.8, 5.9, 5.10) mostró que el Parque Ecológico de la Ciudad de México registró el mayor número de valores más altos en cinco criterios: Endemismo, Especies en Riesgo, Heterogeneidad Ambiental, Representatividad y Riqueza. Le siguió el Desierto de los Leones con valores más altos en tres criterios: Extensión, Representatividad y Servicios Ambientales. En tercer lugar quedó Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, que presentó el valor más alto para Naturalidad y Servicios Ambientales. Finalmente quedó ubicada la Sierra Guadalupe, que calificó más alto en Especies en Riesgo. La Sierra Santa Catarina y El Tepeyac no presentaron ningún valor alto; por el contrario se ubicaron siempre en los últimos lugares (Tablas 5.8, 5.9).

En general, Cumbres del Ajusco, Desierto de los Leones, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra de Guadalupe se ubicaron siempre en los primeros lugares de valor de criterios, con excepción de la última que no fue considerada para el criterio de Servicios Ambientales por pertenecer a una zona de déficit hídrico. Los Bosques de la Cañada de Contreras presentó valores intermedios en todos los criterios (Tablas 5.8, 5.9).

V.1.3 Combinación Lineal Ponderada

El resultado de la Combinación Lineal Ponderada (Tabla 5.11) generó valores de cero a 1 que representaron los valores del índice de valor para la bioconservación en el Distrito Federal (Tabla 5.12).

La calificación más alta fue para el Desierto de los Leones y la más baja correspondió a El Tepeyac. Con calificación de cinco a siete se ubicaron Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Parque Ecológico de la Ciudad de México, Cumbres del Ajusco y Sierra Guadalupe. Por debajo de cinco quedaron Los Bosques de la Cañada de Contreras, y por debajo de uno Sierra Santa Catarina (Tabla 5.12).

Tabla 5.1 Valores de importancia del AHP por criterio

Criterio	Valor de importancia
Representatividad	0.267
Naturalidad	0.237
Extensión	0.167
Endemismo	0.096
Especies en riesgo	0.089
Servicios ambientales	0.061
Riqueza	0.053
Heterogeneidad ambiental	0.030

Tabla 5.2 Extensiones de los tipos de vegetación natural por Área Natural Protegida

Área Natural Protegida	Tipo de vegetación	Área (ha)
Los Bosques de la Cañada de Contreras		290
	Bosque de oyamel	160
	Pastizal	30
	Vegetación de Cañada	80
	Zacatonal alpino	20
Cumbres del Ajusco		510
	Bosque de oyamel	60
	Bosque de pino	40
Desierto de los Leones	Pastizal	410
		1530
	Bosque de oyamel	1020
	Vegetación de cañada	90
	Bosque de pino	20
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	Zacatonal alpino	90
	Pastizal	310
		640
	Bosque de oyamel	540
	Pastizal	30
Parque Ecológico de la Ciudad de México	Bosque de pino	70
		600
	Bosque de pino	90
	Zacatonal alpino	10
	Matorral xerófilo	200
Sierra Guadalupe	Bosque de encino	300
		680
	Bosque de encino	20
	Matorral xerófilo	200
	Pastizal	250
Sierra Santa Catarina	Zacatonal alpino	210
		260
	Matorral xerófilo	210
	Pastizal	50
El Tepeyac		50
	Matorral xerófilo	30
	Pastizal	20

Tabla 5.3 Número estimado de especies de vertebrados terrestres por Área Natural Protegida del Distrito Federal

Área Natural Protegida	Número estimado de especies
Los Bosques de la Cañada de Contreras	173
Cumbres del Ajusco	234
Desierto de los Leones	234
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	234
Parque Ecológico de la Ciudad de México	269
Sierra Guadalupe	255
Sierra Santa Catarina	69
El Tepeyac	69

Tabla 5.4 Número estimado de especies endémicas de vertebrados terrestres por Área Natural Protegida del Distrito Federal

Área Natural Protegida	Número estimado de especies
Los Bosques de la Cañada de Contreras	25
Cumbres del Ajusco	49
Desierto de los Leones	49
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	49
Parque Ecológico de la Ciudad de México	53
Sierra Guadalupe	50
Sierra Santa Catarina	1
El Tepeyac	1

Tabla 5.5 Número estimado de especies de vertebrados terrestres en riesgo por Área Natural Protegida del Distrito Federal

Área Natural Protegida	Número estimado de especies en riesgo
Los Bosques de la Cañada de Contreras	6
Cumbres del Ajusco	10
Desierto de los Leones	10
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	10
Parque Ecológico de la Ciudad de México	11
Sierra Guadalupe	11
Sierra Santa Catarina	0
El Tepeyac	0

Tabla 5.6 Distancias promedio a vías de comunicación y suelo con ocupación urbana por Área Natural Protegida del Distrito Federal

Área Natural Protegida	Distancia promedio
Los Bosques de la Cañada de Contreras	460
Cumbres del Ajusco	380
Desierto de los Leones	450
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	1690
Parque Ecológico de la Ciudad de México	840
Sierra Guadalupe	1070
Sierra Santa Catarina	380
El Tepeyac	210

Tabla 5.7 Valor de importancia hídrica por área (ha), factores de ponderación e importancia hídrica final por Área Natural Protegida del Distrito Federal

Área Natural Protegida	Importancia hídrica	Área (ha)	Factor de ponderación	Importancia final
Los Bosques de la Cañada de Contreras	1	510	0.864	2.35
	2	80	0.136	
	4	670		
Cumbres del Ajusco	4	1520		2.824
	2	90	0.176	
Desierto de los Leones	3	420	0.824	3.000
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	1	30	0.150	1.000
Parque Ecológico de la Ciudad de México	2	70	0.350	1.136
	3	100	0.500	

Tabla 5.8 Matriz de valores de los criterios por Área Natural Protegida

Área Natural Protegida	Endemismo	Especies en riesgo	Extensión	Heterogeneidad ambiental	Naturalidad	Representatividad	Riqueza	Servicios ambientales
Los Bosques de la Cañada de Contreras	0.472	0.545	0.003	1.102	380	0.571	0.634	2.350
Cumbres del Ajusco	0.925	0.909	0.006	0.984	1073	0.429	0.857	2.824
Desierto de los Leones	0.925	0.909	0.017	0.627	840	0.714	0.857	4.000
Insurgente Miguel Hidalgo	0.925	0.909	0.007	0.529	1690	0.429	0.857	4.000
Parque Ecológico de la Ciudad de México	1.000	1.000	0.007	1.233	460	0.714	0.985	1.136
Sierra Guadalupe	0.944	1.000	0.008	1.194	450	0.571	0.934	0.000
Sierra Santa Catarina	0.019	0.000	0.003	0.490	380	0.286	0.253	0.000
El Tepeyac	0.019	0.000	0.001	0.673	210	0.286	0.253	0.000

Tabla 5.9 Matriz de valores estandarizados (valores de utilidad) de los criterios por Área Natural Protegida

Área Natural Protegida	Endemismo	Especies en riesgo	Extensión	Heterogeneidad ambiental	Naturalidad	Representatividad	Riqueza	Servicios ambientales
Los Bosques de la Cañada de Contreras	0.462	0.545	0.162	0.825	0.116	0.666	0.520	0.424
Cumbres del Ajusco	0.923	0.909	0.311	0.185	0.583	0.333	0.825	0.589
Desierto de los Leones	0.923	0.909	1.000	0.665	0.423	1.000	0.825	1.000
Insurgente Miguel Hidalgo	0.923	0.909	0.399	0.053	1.000	0.333	0.825	1.000
Parque Ecológico de la Ciudad de México	1.000	1.000	0.399	1.000	0.168	1.000	1.000	0.000
Sierra Guadalupe	0.942	1.000	0.426	0.948	0.159	0.666	0.930	0.000
Sierra Santa Catarina	0.000	0.000	0.142	0.000	0.116	0.000	0.000	0.000
El Tepeyac	0.000	0.000	0.000	0.247	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 5.10 Funciones de utilidad por criterio; y representa el valor de utilidad y x es el valor del criterio para cada Área Natural Protegida

Criterio	Función de utilidad
Endemismo	$y=1.0192x - 0.0192$
Especies en Riesgo	$y=x$
Extensión	$y=0.0007x - 0.334$
Heterogeneidad Ambiental	$y=1.3455x - 0.6587$
Naturalidad	$y=0.0007x - 0.1419$
Representatividad	$y=2.3333x - 0.6667$
Riqueza	$y=1.365x - 0.345$
Servicios Ambientales	$y=0.3419x - 0.3964$

Tabla 5.11. Matriz con los resultados de la Combinación Lineal Ponderada del peso por el valor estandarizado de los criterios en cada Área Natural Protegida

	Endemismo	Especies en riesgo	Extensión	Heterogeneidad ambiental	Naturalidad	Representatividad	Riqueza	Servicios ambientales
Los Bosques de la Cañada de Contreras	0.044	0.049	0.027	0.024	0.028	0.178	0.028	0.026
Cumbres del Ajusco	0.089	0.081	0.052	0.005	0.138	0.089	0.044	0.036
Desierto de los Leones	0.089	0.081	0.167	0.020	0.100	0.089	0.044	0.061
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	0.089	0.089	0.067	0.001	0.237	0.178	0.050	0.000
Parque Ecológico de la Ciudad de México	0.096	0.000	0.067	0.030	0.040	0.000	0.000	0.000
Sierra Guadalupe	0.090	0.000	0.071	0.028	0.038	0.000	0.000	0.000
Sierra Santa Catarina	0.000	0.081	0.024	0.000	0.028	0.267	0.044	0.061
El Tepeyac	0.000	0.089	0.000	0.007	0.000	0.267	0.053	0.000

Tabla 5.12 Valores del índice de contribución a la conservación de los recursos naturales del Distrito Federal por Área Natural Protegida

Área Natural Protegida	Valor del índice
Los Bosques de la Cañada de Contreras	0.4
Cumbres del Ajusco	0.5
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	0.7
Sierra Guadalupe	0.5
Sierra Santa Catarina	0.05
El Tepeyac	0.007
Desierto de los Leones	0.8
Parque Ecológico de la Ciudad de México	0.6

V.2 Esquema de Planeación Ambiental

Dentro de las ANPs, que se evaluaron con el índice de contribución a la conservación de los recursos naturales, se seleccionaron dos casos de estudio: El Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina. El Parque Ecológico de la Ciudad de México se ubicó en las calificaciones más altas del índice con solo dos ANPs por arriba: Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla y Desierto de los Leones. Por el contrario, la Sierra Santa Catarina ocupó el penúltimo lugar, pues El Tepeyac obtuvo una calificación mas baja (Tabla 5.12).

La asignación de las actividades para cada caso de estudio se hizo de acuerdo a los resultados del índice. Así, para el caso del Parque Ecológico de la Ciudad de México se consideró la protección especial de la biodiversidad como una de las actividades, al contrario que en el caso de la Sierra Santa Catarina en el que esta actividad no fue considerada (Tablas 5.13). Las definiciones precisas de estas actividades se muestran en la tabla 5.14.

V.2.1 Parque Ecológico de la Ciudad de México

El análisis de aptitud para el Parque Ecológico de la Ciudad de México involucró un total de cinco variables o criterios de decisión (Tablas 5.15 y 5.16). Al ponderarse éstas con respecto a su importancia para cada actividad, se generaron los mapas de aptitud por actividad.

Considerando los valores altos de aptitud (es decir, calificaciones mayores de 7) para cada combinación lineal ponderada por separado, las extensiones mayores corresponden a la actividad de educación ambiental y de protección especial de la biodiversidad con 39 y 38% del área de estudio, respectivamente. Las actividades de manejo de recursos naturales y de uso público presentaron porcentajes menores (14% y

7% respectivamente). En cuanto a la recuperación ambiental, en el área de estudio no se registraron calificaciones altas (Tabla 5.17).

La clasificación numérica identificó cuatro grupos de aptitud a partir de tres análisis de componentes principales (Figura 5.1). El Grupo 1 abarcó el 39% del área de estudio. La aptitud de acuerdo a los residuales de Gower (Figuras 5.1 y 5.2) se encauzó principalmente hacia la actividad de educación ambiental, ya que el 65% de su área correspondió al valor de 10 de aptitud (Tabla 5.18). El tipo de vegetación predominante fue bosque abierto de encino con el 67% de la extensión total, mientras que el suelo con ocupación urbana ocupó el 23% del área (Tabla 5.19).

La cobertura del Grupo 2 fue del 14% del área de estudio y su aptitud relativa se relacionó, exclusivamente, con el manejo de recursos naturales (Figuras 5.1 y 5.2). Así, el 100% de su extensión presentó la calificación más alta para esta actividad (Tabla 5.20). En cuanto a tipos de vegetación el Grupo 2 presenta el 51% de su extensión con bosque abierto de encino y el 49% con bosque abierto de pino (Tabla 5.19).

El grupo 3 ocupó el 39% del total del área de estudio. Su aptitud relativa se orientó hacia protección especial (Figuras 5.1 y 5.2) ya que el 90% de su extensión presentó valor de 10 para esta actividad y 8% obtuvo calificación de 7 (Tabla 5.21). Las porciones mayores de vegetación las ocuparon el bosque denso de pino y el bosque de encino pino con 40 y 44% respectivamente. Porcentajes menores presentaron el bosque denso de encino, el bosque de oyamel y el pastizal (9, 5 y 1%, respectivamente; Tabla 5.19).

El grupo 4 fue el más pequeño; se extendió en el 8% del área. Su aptitud se encauzó predominantemente hacia uso público (Figuras 5.1 y 5.2). De esta manera, la totalidad de su extensión calificó con valor de 10 para dicha actividad (Tabla 5.22). El único tipo de vegetación presente fue el pastizal (Tabla 5.19).

V.2.2 Sierra Santa Catarina

El análisis de aptitud para la Sierra Santa Catarina involucró un total de seis criterios de decisión o variables (Tabla 5.23 y 5.24). Al ponderarse éstas con respecto a su importancia para cada actividad, se generaron los mapas de aptitud por actividad.

Considerando los valores altos de aptitud (es decir < 7) para cada combinación lineal ponderada por separado, las extensiones mayores corresponden a la actividad de manejo de recursos naturales con 72% del área de estudio. Le siguió el uso público tipo B con 17% de la extensión total. Las actividades de educación ambiental, uso público tipo A y recuperación ambiental ocuparon extensiones menores (9, 5 y 1% respectivamente; Tabla 5.25).

La clasificación numérica identificó tres grupos de aptitud a partir de dos análisis de componentes principales (Figura 5.3). El Grupo 1 resultó ser el más extenso, ya que abarcó el 43% del área de estudio. La aptitud de acuerdo a los residuales de Gower (Figuras 5.3 y 5.4) se encauzó principalmente hacia las actividades de uso público tipo A y de recuperación ambiental, y en menor grado hacia el manejo de recursos naturales. Así, el 16% de su extensión presentó calificaciones altas para uso público tipo A, 2% calificó con 7 ó 10 para recuperación ambiental, y el 72% de su área obtuvo calificación de 7 para manejo de recursos naturales (Tablas 5.26, 5.27 y 5.28). El uso de suelo predominante fue la agricultura con el 72% de la extensión total, seguido del uso de suelo urbano con 25% y un porcentaje menor (4%) se repartió entre uso de suelo minero y vegetación herbácea con arbustos (Tabla 5.29).

La cobertura del Grupo 2 fue del 40% del área de estudio y su aptitud relativa se relacionó predominantemente con el manejo de recursos naturales y el uso público tipo A (Figuras 5.3 y 5.4). Consecuentemente, el 100% de su extensión presentó la calificación más alta para el manejo de recursos naturales, mientras que en el 12%

ocurrió lo mismo para la actividad de uso público tipo A (Tablas 5.26 y 5.28). El único uso de suelo presente fue el agrícola (Tabla 5.29).

El grupo 3 fue el menos extenso, pues sólo ocupó el 17% del total del área de estudio. Su aptitud relativa se orientó hacia uso público tipo B, y en menor grado hacia educación ambiental y recuperación ambiental (Figuras 5.3 y 5.4). De esta manera, el 75% de su extensión calificó de 7 a 10 para uso público tipo B, y lo mismo sucede para educación ambiental en el 42% del área (Tablas 5.30 y 5.31). La porción mayor de vegetación la ocupó la vegetación herbácea con arbustos con el 68%, seguida del matorral de *Senecio* con el 6%; en conjunto el resto de los matorrales presentes en el área (*Sedum*, *Nolina-Quercus* y *Buddleia-Senecio*) ocupan el 4%. El uso de suelo mejor representado fue la agricultura con 22% de la extensión total y sólo un porcentaje menor (1%) estuvo ocupado por suelo urbano (Tabla 5.29).

Tabla 5.13 Actividades seleccionadas en el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina.

Actividad	Área Natural Protegida	
	Parque Ecológico de la Ciudad de México	Sierra Santa Catarina
Educación ambiental	*	*
Manejo de Recursos Naturales	*	*
Protección especial	*	
Recuperación ambiental	*	*
Uso público	*	
Uso público tipo A		*
Uso público tipo B		*

Tabla 5.14 Definición de las actividades para el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina.

Actividad	Definición
Educación ambiental	Labores encaminadas a promover entre el público en general el conocimiento del ecosistema y promover su cuidado y protección.
Manejo de recursos naturales	Trabajos de reforestación y revegetación así como a labores productivas como cultivo de especies vegetales aprovechables.
Protección especial	Conservación de áreas con alto valor biológico.
Recuperación ambiental	Control de la erosión.
Uso público	Aprovechamiento de zonas con fines recreativos para el público en general.
Uso público tipo A	Aprovechamiento de zonas cercanas a los centros de población con fines recreativos.
Uso público tipo B	Aprovechamiento de zonas altas con fines deportivos y culturales.

Tabla 5.15 Lista de variables para el análisis de aptitud del Parque Ecológico de la Ciudad de México

Variable	Educación ambiental		Manejo de recursos naturales		Protección especial		Recuperación ambiental		Uso público	
	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable
Tipo de vegetación	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable	Favorable	Desfavorable
	Bosque abierto de encino	Restante	Bosque abierto de pinos	Restante	Bosque denso de encino	Restante	Matorral de <i>Senecio/Buddleia-Senecio</i>	Restante	Pastizal	Restante
	Bosque abierto de pino		Bosque abierto de encinos		Bosque denso de pino		de <i>Senecio/Buddleia-Senecio</i>			
	Matorral de <i>Senecio/Buddleia-Senecio</i>				Bosque de encino-pino					
					Bosque de oyamel					
					Matorral de <i>Sedum oxypetalum</i>					
Pendiente	< 15°	>15°	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	<15°	>15°
Uso de suelo	No aplica	No aplica	Agrícola	Restante	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Urbano	Restante
Distancia a asentamientos humanos, vías de comunicación y zonas agrícolas	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	>200 m	<200 m	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Erosión potencial	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Alta	Restante	Alta	Restante

Tabla 5.16 Jerarquía de variables por actividad en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Actividad	Variable	Jerarquía
Educación ambiental	Tipo de vegetación	1
	Pendiente	2
Manejo de recursos naturales	Tipo de vegetación	1
	Uso de suelo	2
Protección especial	Tipo de vegetación	1
	Distancia a asentamientos humanos, vías de comunicación y zonas agrícolas	2
Recuperación ambiental	Tipo de vegetación	1
	Erosión potencial	2
Uso público	Tipo de vegetación	1
	Pendiente	2
	Uso de suelo	3
	Erosión potencial	4

Tabla 5.17 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud para las actividades del Parque Ecológico de la Ciudad de México

Valor de aptitud	Actividad				
	Educación ambiental	Manejo de recursos naturales	Protección especial	Recuperación ambiental	Uso público
1	64	1294	225	919	72
2	0	0	0	0	3
3	875	0	712	652	0
4	0	0	0	0	1233
5	0	63	0	0	0
6	0	0	0	0	148
7	19	0	51	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	616	217	556	3	118

Tabla 5.18 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad educación ambiental y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Grupo	Valor de aptitud										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	10	0	200	0	0	0	10	0	0	410	620
2	0	0	0	0	0	0	10	0	0	210	220
3	60	0	560	0	0	0	0	0	0	0	620
4	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	120
Total	70	0	880	0	0	0	20	0	0	620	1580

Tabla 5.19 Superficie ocupada (ha) por grupo de aptitud y tipo de vegetación y usos del suelo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Grupo	Vegetación y usos del suelo										Total
	Bosque de Oyamel	Agrícola	Urbano	Bosque denso de pino	Bosque abierto de pino	Pastizal	Matorral de <i>Buddleia-Senecio</i>	Bosque abierto de encino	Bosque encino-pino	Bosque denso de encino	
1	0	60	140	0	0	0	420	0	0	0	620
2	0	0	0	0	110	0	0	110	0	0	220
3	30	0	0	250	0	10	0	0	270	50	620
4	0	0	0	0	0	120	0	0	0	0	120
Total	30	60	140	250	110	130	420	110	270	50	1580

Tabla 5.20 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad manejo de recursos naturales y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Grupo	Valor de aptitud										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	560	0	0	0	60	0	0	0	0	0	620
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	220	220
3	620	0	0	0	0	0	0	0	0	0	620
4	120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120
Total	1300	0	0	0	60	0	0	0	0	220	1580

Tabla 5.21 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad protección especial y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Grupo	Valor de aptitud										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	240	0	380	0	0	0	0	0	0	0	620
2	10	10	200	0	0	0	0	0	0	0	220
3	0	0	10	0	0	0	50	0	0	560	620
4	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	120
Total	250	10	710	0	0	0	50	0	0	560	1580

Tabla 5.22 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad uso público y por grupo en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Grupo	Valor de aptitud										Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	20	0	0	460	0	140	0	0	0	0	620
2	10	0	0	210	0	0	0	0	0	0	220
3	40	0	0	560	0	10	0	0	0	0	620
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	120
Total	70	0	0	1230	0	150	0	0	0	120	1580

Tabla 5.23 Lista de variables para el análisis de aptitud de la Sierra Santa Catarina

Variable	Educación ambiental			Mantajeo de recursos naturales			Recuperación ambiental			Actividad					
	Favorable	Desfavorable	Restante	Favorable	Desfavorable	No aplica	Favorable	Desfavorable	No aplica	Favorable	Desfavorable	No aplica	Favorable	Desfavorable	Restante
Tipo de vegetación	Matarral de <i>Sedum</i> Vegetación herbácea con arbustos	Matarral de <i>Senecio</i>	Matarral de <i>Nolina-Quercus</i> Matarral de <i>Buddleia-Senecio</i>	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Favorable Matarral de <i>Sedum</i>	Desfavorable Vegetación herbácea con arbustos	Restante
Altitud	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	>2400 msnm	<2400 msnm	
Pendiente	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	<15°	>15°	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Uso de suelo	No aplica	No aplica	No aplica	Agrícola	Restante	Restante	Minero	Restante	Restante	Suelo agrícola y urbano	Suelo minero	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Distancia a asentamientos humanos y vías de comunicación	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	<100 m	>100 m	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Erosión potencial	Baja y moderada	Alta	Baja y moderada	Baja y moderada	Alta	Alta	Alta	Restante	Restante	Baja y moderada	Alta	Alta	Baja	Restante	Restante

Tabla 5.24 Jerarquía de variables por actividad en la Sierra Santa Catarina

Actividad	Variable	Jerarquía
Educación ambiental	Tipo de vegetación	1
	Uso de suelo	2
	Pendiente	3
	Erosión potencial	4
Manejo de recursos naturales	Uso de suelo	1
	Erosión	2
Recuperación ambiental	Uso de suelo	1
	Erosión potencial	2
Uso público tipo A	Distancia a asentamientos humanos	1
	Uso de suelo	2
	Pendiente	3
	Erosión potencial	4
Uso público tipo B	Altitud	1
	Tipo de vegetación	2
	Erosión potencial	3

Tabla 5.25 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud para las actividades de la Sierra Santa Catarina

Valor de aptitud	Actividad				
	Educación ambiental	Manejo de recursos naturales	Recuperación ambiental	Uso público tipo A	Uso público tipo B
1	100	340	1400	290	720
2	60	0	0	50	1120
3	850	400	1060	130	30
4	0	0	0	50	0
5	1340	0	0	780	260
6	0	0	0	1080	0
7	110	790	40	10	160
8	40	0	0	0	150
9	0	0	0	60	0
10	70	1040	70	130	140

Tabla 5.26 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad uso público tipo A y por grupo en la Sierra Santa Catarina

Grupo	Valor de aptitud										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 Total	
1	0	0	60	10	780	180	10	0	60	0	1100
2	0	0	0	20	0	900	0	0	0	130	1040
3	290	50	60	20	0	0	0	0	0	0	430
Total	290	50	120	50	780	1080	10	0	60	130	2570

Tabla 5.27 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad recuperación ambiental y por grupo en la Sierra Santa Catarina

Grupo	Valor de aptitud										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 Total	
1	190	0	890	0	0	0	10	0	0	10	1100
2	1040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1040
3	170	0	170	0	0	0	30	0	0	60	430
Total	1400	0	1060	0	0	0	40	0	0	70	2570

Tabla 5.28 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad manejo de recursos naturales y por grupo en la Sierra Santa Catarina

Grupo	Valor de aptitud										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 Total	
1	110	0	200	0	0	0	790	0	0	0	1100
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1040	1040
3	240	0	200	0	0	0	0	0	0	0	430
Total	350	0	400	0	0	0	790	0	0	1040	2570

Tabla 5.29 Superficie ocupada (ha) por grupo de aptitud y tipo de vegetación y usos del suelo en la Sierra Santa Catarina

Grupo	Tipo de vegetación o usos de suelo								
	Agrícola	Mínimo	Urbano	Vegetación herbácea con arbustos	Matorral de <i>Sedum</i>	Matorral de <i>Senecio</i>	Matorral de <i>Nolina-Quercus</i>	Matorral de <i>Buddleia-Senecio</i>	Total
1	790	20	270	20	0	0	0	0	1100
2	1040	0	0	0	0	0	0	0	1040
3	0	90	0	290	30	0	10	10	430
Total	1830	110	270	310	30	0	10	10	2570

Tabla 5.30 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad uso público tipo B y por grupo en la Sierra Santa Catarina

Grupo	Valor de aptitud										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
1	680	180	10	0	220	0	10	0	0	0	1100
2	0	930	0	0	0	0	120	0	0	0	1040
3	30	10	20	0	40	0	40	150	0	140	430
Total	710	1120	30	0	260	0	170	150	0	140	2570

Tabla 5.31 Superficie ocupada (ha) por valor de aptitud de la actividad educación ambiental y por grupo en la Sierra Santa Catarina

Grupo	Valor de aptitud										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
1	50	10	840	0	180	0	0	10	0	0	1100
2	0	20	0	0	1020	0	0	0	0	0	1040
3	50	20	20	0	140	0	110	40	0	60	430
Total	101	52	863	4	1345	6	117	58	9	70	2570

Figura 5.1 Grupos de aptitud en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

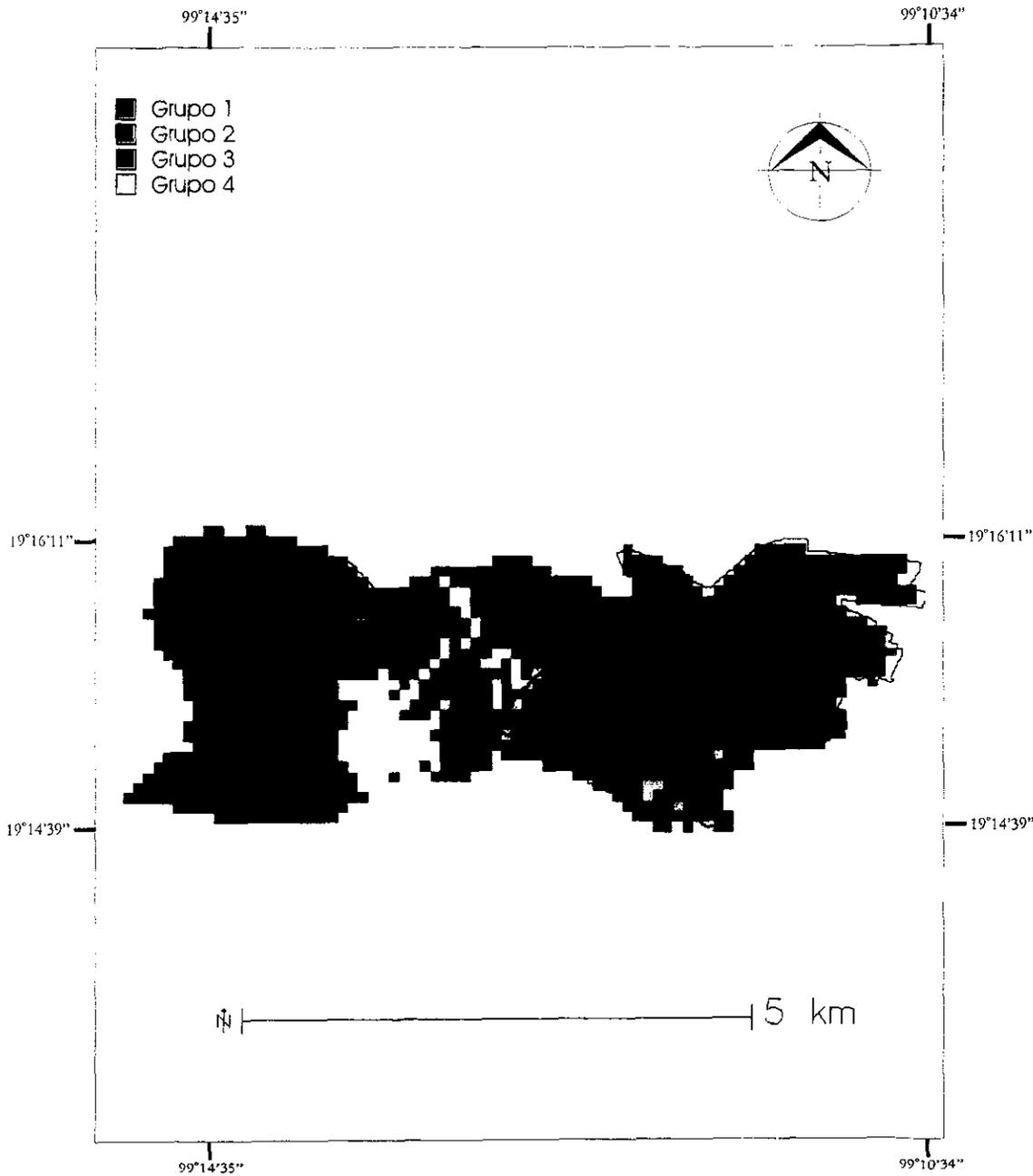


Figura 5.1. Grupos de aptitud en el Parque Ecológico de la Ciudad de México

Figura 5.2 Residuales de Gower para las actividades del Parque Ecológico de la Ciudad de México

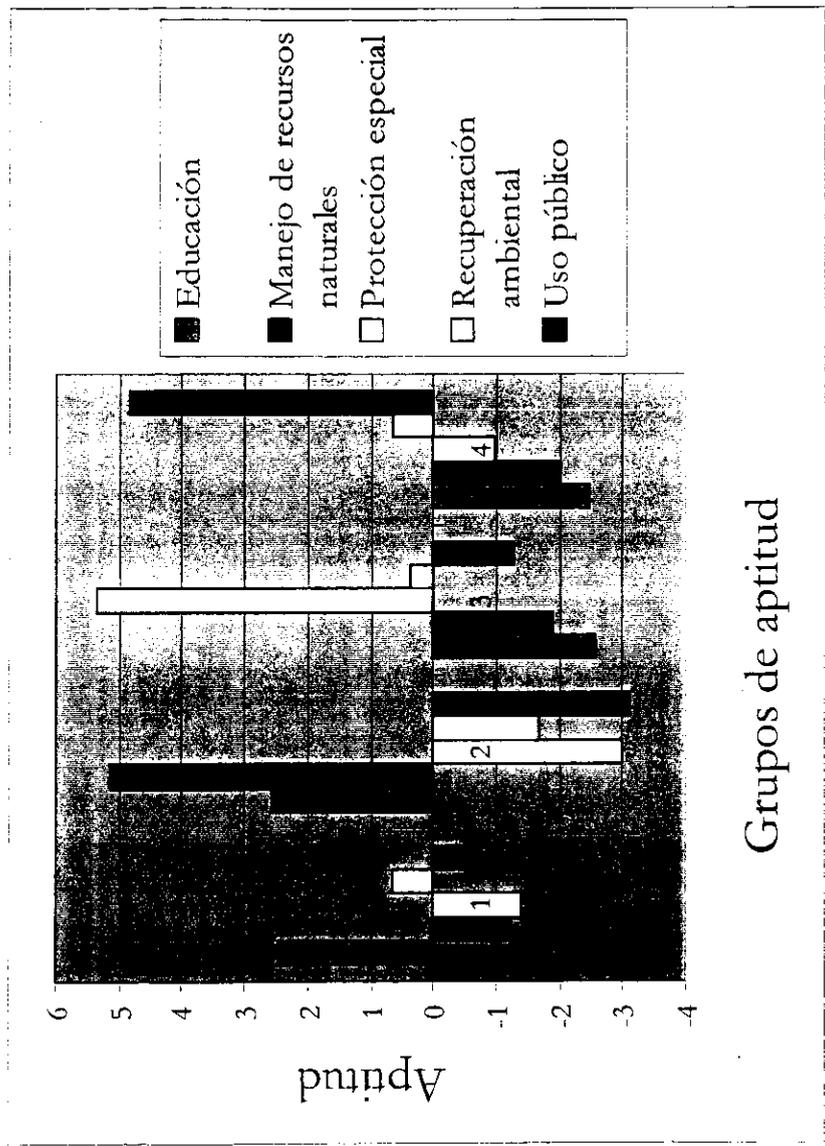


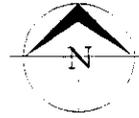
Figura 5.2. Residuales de Gower para las actividades del Parque Zoológico de la Ciudad de México

Figura 5.3 Grupos de Aptitud en la Sierra Santa Catarina

99°14'35"

99°10'34"

- Grupo 1
- Grupo 2
- Grupo 3



19°20'10"

19°20'10"



19°15'24"

19°15'24"

5 km

99°14'35"

99°10'34"

Figura 5.3. Grupos de aptitud en la Sierra Santa Catarina

Figura 5.4 Residuales de Gower para las actividades de la Sierra Santa Catarina

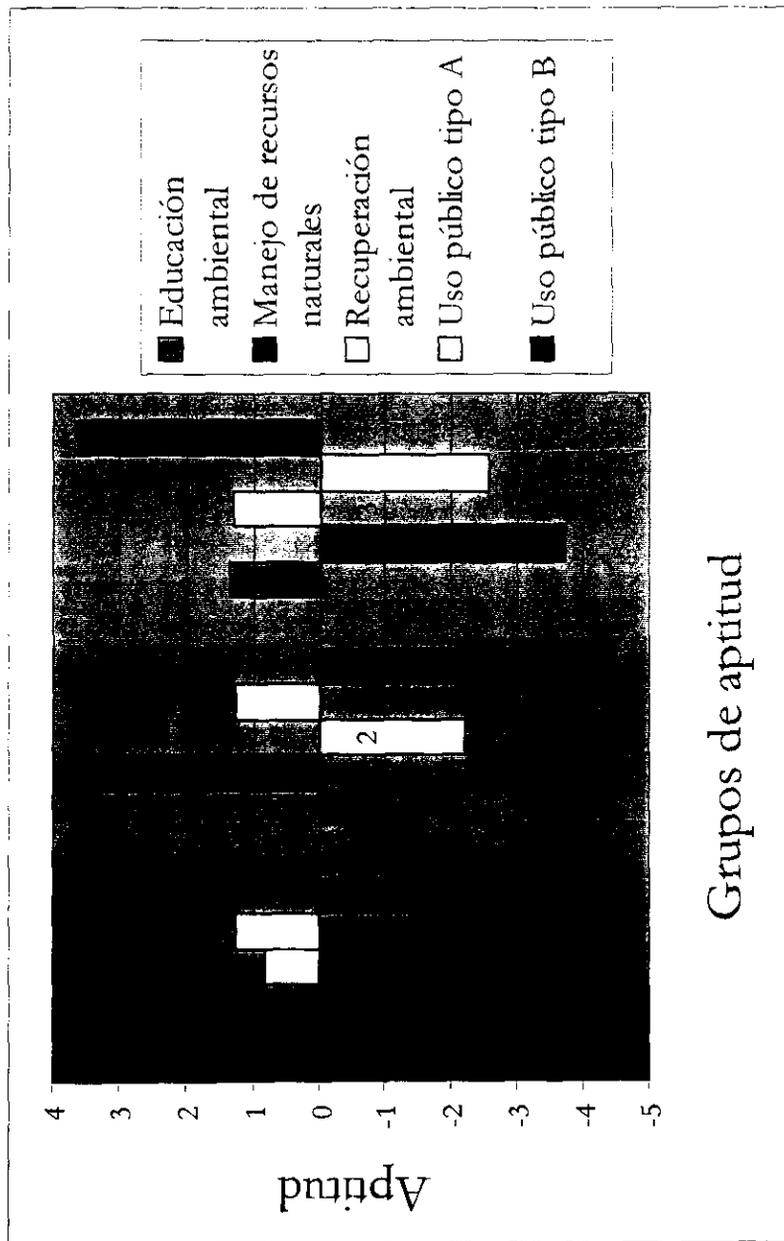


Figura 5.4. Residuales de Gowcr para las actividades de la Sierra Santa Catarina

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Possingham (1997) señala que, es esencial el desarrollo de una teoría de conservación dentro de un marco explícito de toma de decisiones. En este sentido, este trabajo es un ejemplo de cómo las técnicas de la teoría de decisión pueden ser empleadas en la incorporación de conceptos e información científica, así como de la percepción de los distintos actores sociales a estrategias de planeación ambiental y patrones de uso de suelo.

El uso de técnicas de decisión no necesariamente lleva a la decisión adecuada, pero si ayuda a que la decisión tomada sea consistente con las metas establecidas (Ralls y Satarfield, 1994). En este estudio, la elaboración del índice de valor para la bioconservación permitió la evaluación de ocho ANPs del Distrito Federal con respecto a su contribución a la bioconservación regional y el establecer metas específicas para dos de ellas: Parque Ecológico de la Ciudad de México y Sierra Santa Catarina. Dichas metas constituyen las actividades asignadas en estas ANPs.

La conservación representa un tipo de uso de suelo que compite con otros (agricultura, silvicultura, recreación, desarrollo urbano e industria) por el uso de los recursos naturales (Margules y Usher 1981). Más aún, se ha propuesto que una estrategia efectiva de conservación debe integrar a los objetivos conservacionistas con otros objetivos en esquemas de planeación coherentes (Gilbert, 1979; Conacher, 1980). Los resultados del análisis de aptitud para el Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina confirman esta afirmación. La conservación, entendida como la protección a zonas con valor biológico, fue considerada como una de varias actividades que se pueden realizar en un ANP, que por sus características biológicas así lo amerite, como es el caso de l Parque Ecológico de la ciudad de México.

actores involucrados y las actividades que éstos llevan a cabo (Bojórquez-Tapia y Díaz, en prensa; Bojórquez-Tapia et al. , 1999; Malcewski, 1999). Uno de los productos finales de dicho análisis es un mapa de grupos de aptitud. En un contexto de Programa de Manejo, este mapa representa la zonificación del área.

De manera general, el proceso que lleva a la zonificación carece de una técnica rigurosa y analítica en México. Ello ha provocado que la zonificación de ANPs se lleve a cabo sin criterios explícitos. De esta manera el análisis de aptitud constituye una aportación a la formalización del proceso de toma de decisiones en programas de manejo para ANP, y concuerda con una zonificación congruente con las metas específicas de cada ANP y con los usos del suelo de los actores sociales presentes.

Al aplicar las técnicas de decisión a un problema de conservación y manejo se pudo constatar como, en general, las ventajas que ofrecen se cumplen. En concreto estas ventajas son seis (Ralls y Starfield, 1994): (1) proporcionan un proceso de decisión explícito, bien documentado y reproducible que ayuda a justificar una decisión; (2) su uso y entendimiento resultan accesibles incluso para aquellos que no están familiarizados con los métodos multicriterio de toma de decisiones; (3) promueven la discusión centrada en objetivos y prioridades; (4) facilitan la evaluación estructurada de múltiples objetivos y sus posibles consecuencias; (5) permiten ser usadas en dinámicas de grupo y en discusiones; y (6) tienden a producir recomendaciones sólidas.

Así, el conocimiento de expertos, la información biológica y física y, la experiencia de autoridades y encargados del manejo de ANPs sirvieron para construir reglas de decisión en el marco de un problema con diversos criterios y objetivos. En este sentido, el AHP, la combinación lineal ponderada y el análisis de aptitud fueron fáciles de usar en entrevistas con expertos y talleres de planeación participativa. Más aún, estas técnicas promovieron discusiones centradas en metas específicas. En cuanto a la solidez de las recomendaciones que se pudieron generar resulta importante señalar que, en este trabajo, ésta se basa en los criterios que fueron establecidos y ponderados por los

expertos en biología de la conservación. Este trabajo se realizó bajo condiciones de incertidumbre en dos aspectos: (1) la carencia de información sobre riqueza de especies, endemismo y especies bajo alguna categoría de riesgo y (2) las discrepancias, derivadas de distintos niveles en la resolución, entre el mapa de vegetación y uso de suelo del Distrito Federal y los mapas de vegetación y uso de suelo del Parque Ecológico de la Ciudad de México y la Sierra Santa Catarina. Sin embargo, las técnicas utilizadas permitieron compensar esta carencia de información y llegar a recomendaciones específicas.

Una de las barreras que ha impedido que la ciencia, en especial la ecología, juegue un papel importante en el manejo de recursos naturales es que encargados de la toma de decisiones no siempre están familiarizado con los paradigmas ecológicos, por tanto resulta difícil que a partir de éstos diseñen estrategias de manejo. Este trabajo es un ejemplo de cómo es posible “derrumbar” esta barrera. Primero, los criterios utilizados para la formación del índice son conceptos derivados del trabajo científico y del conocimiento de los componentes y las interrelaciones de los ecosistemas, y segundo, el resultado final es un índice que, dependiendo de su importancia a la bioconservación regional en una escala, asigna a cada ANP a un valor del 0 al 1. Su uso y entendimiento por parte de los encargados de la toma de decisiones resulta accesible aún cuando éstos no se encuentren familiarizados con conceptos de ecológicos.

Los resultados de este trabajo sugieren que el papel de la ciencia, y en especial de la ecología, no es la generación de estrategias de planeación ambiental, sino que su papel dentro del manejo de recursos naturales es el de generadora de criterios y restricciones para la toma de decisiones, basadas en el conocimiento de los componentes y procesos que tienen lugar en los ecosistemas.

En cuanto a las recomendaciones que se generan de este trabajo, se puede decir que, los resultados del índice señalan al Desierto de los Leones, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla y, Parque Ecológico de la Ciudad de México como las ANPs de mayor

importancia para la bioconservación en el Distrito Federal. Por tanto, estas áreas deberán ser consideradas como prioritarias para la bioconservación. Por otro lado, surge la idea de que la protección especial no debe ser considerada como una actividad adecuada para la Sierra Santa Catarina o El Tepeyac.

Con relación a la capacidad de uso de suelo de las áreas correspondientes a los estudios de caso, el análisis de aptitud para los estudios de caso permitió la identificación de zonas con potencial para generar conflictos ambientales. En la Sierra Santa Catarina, los grupos de aptitud presentaron valores altos para más de una actividad. Sin embargo, sólo en un el caso del Grupo1 se identifican conflictos ambientales, ya que las actividades de uso público tipo A y recuperación ambiental no son complementarias. En este caso, la recomendación es que se debe dar prioridad a la recuperación ambiental. Es importante señalar que aunque la Sierra Santa Catarina no es calificada por el índice de valor para la bioconservación como un área importante, ésta pertenece a las ANP del Distrito Federal y constituye un espacio que, por su carácter legal, puede ser aprovechado por las autoridades para actividades como la educación ambiental y la recreación de los pobladores locales. Estas actividades constituyen un mecanismo indirecto para la conservación de los recursos naturales y directo, para incrementar la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México. Por otro lado, para el caso del Parque Ecológico de la Ciudad de México, no se prevén conflictos ambientales ya que a cada actividad le correspondió un grupo de aptitud con excepción de recuperación ambiental que no registró aptitudes altas en ningún sitio. En particular, este resultado parece estar relacionado con el hecho de que en el Parque Ecológico de la Ciudad de México no se observan valores altos de erosión potencial; por tanto, las actividades relacionadas con el combate de éste fenómeno no deben ser prioritarias para los manejadores del área. Es importante señalar que el análisis de aptitud no sólo se aplicó para los polígonos decretados oficialmente como ANP, sino que abarcó el área que se encuentra entre dichos polígonos. Es en este lugar donde se registraron los valores mas altos para protección especial, debido a la presencia de bosque de oyamel. Este

resultado puede ser la base para incluir ésta área como parte del Parque Ecológico de la Ciudad de México.

En experiencias previas de planeación ambiental, los índices han sido utilizados para representar la calidad ambiental general (Sol et al. 1995). Las características ambientales de ruido, olor, contaminación de aire y riesgo de desastres industriales han servido como indicadores. Por otro lado la distribución de organismos se ha empleado como indicador de la integridad biótica de un ecosistema (Lyons et al. 1995). En este trabajo el índice de valor para la bioconservación representó una valoración de los atributos biológicos y físicos de un ANP y sus resultados se conectaron directamente a un esquema de planeación ambiental.

De la misma manera, el análisis de aptitud fue la base del Ordenamiento Territorial de la Costa Norte de Nayarit (Bojórquez-Tapia et al. en prensa) y el Ordenamiento Ecológico de la Ciudad de México (CORENA 2000). Sin embargo, esta es la primera vez que esta análisis se aplica para la zonificación de ANPs.

Dykstra (1984) señala que el manejo de recursos naturales en ecosistemas requiere más que los datos que proporciona la ciencia pura ya que debe proveer al tomador de decisiones de conclusiones aplicables para obtener el objetivo deseado. También señala que debido a la complejidad de los sistemas la ciencia del manejo tiene carácter multidisciplinario. ¿Dónde se ubica este trabajo dentro del marco de manejo de recursos naturales y de la multidisciplinaria?. Existen tres actores principales dentro de este proceso (Ortolano, 1997): (1)el tomador de decisiones, (2)el analista ambiental y (3)el investigador. El analista ambiental es el puente de comunicación entre los otros dos actores. Éste debe ser capaz, en coordinación con el investigador, de determinar el tipo de datos que se requieren y la manera de obtenerlos, de definir los problemas y determinar las soluciones, y de procesar la información de modo que ésta resulte útil para el tomador de decisiones. Por otro lado, en su interacción con el tomador de decisiones, el analista ambiental deberá ser capaz de establecer y/o modificar metas y objetivos, y, de guiar el monitoreo y la evaluación de proyectos ambientales.

Por lo anterior, es posible decir que éste es un trabajo de análisis ambiental. Las técnicas empleadas incorporan el conocimiento de investigadores y la percepción de los sectores involucrados, además, logran una síntesis que deriva en recomendaciones explícitas y de fácil acceso para los tomadores de decisiones.

VII. LITERATURA CITADA

Bedward, M., R.L. Pressey y D.A. Keith. 1992. A new approach for selecting fully representative reserve networks: addressing efficiency, reserve design and land suitability with an iterative analysis. *Biological Conservation* 62:115-125.

Bojórquez-Tapia, L.A., Díaz-Mondragón, S. *Journal of Environmental Management*. GIS-based approach for participatory decision making and land suitability assessment.

Bojórquez-Tapia, L.A., S. Díaz-Mondragón y P. Gómez-Priego. 1999. GIS-approach for land suitability assesment in developing countries: A case study of forest development project in Mexico. En *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis*, ed. J.C. Thill, Ashgate Publishing Company. Calgary. pp. 335-354.

Bojórquez-Tapia, L.A., S. Díaz-Mondragón y R. Saunier. 1997. Ordenamiento Ecológico de la Costa de Nayarit. Organización de Estados Americanos-Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Bojórquez-Tapia, L.A., E. Ezcurra, M. Masari-Hiriart, S. Díaz-Mondragón, P. Gómez-Priego, G. Alcantar y D. Melgarejo. 2000. Mexico Watershed: A History of Mismanagement. En *Conference on Land Stewardship in the 21st Century: The Contributions of Watershed Management. Global, National and Regional Perspectives.* March 13-16, 2000. Tucson, Arizona.

Bojórquez-Tapia, L.A., P. Ffolliot y D.P. Guertin. 1990. Multiple-resource modeling as a tool for conservation: Its applicability in Mexico. *Environmental Management* 14: 317-324.

- Bojórquez-Tapia, L.A., E. Ongay-Delhumeau y E. Ezcurra. 1994. Multivariate approach for suitability assessment and environmental conflict resolution. *Journal of Environmental Management* 14:187-198.
- Carabias, J., V.M. Toledo y J. Caballero. 1990. Aprovechamiento y manejo de recursos naturales en la región de la Montaña de Guerrero. En *Recursos Naturales, Técnica y Cultura : Estudios y Experiencias para un Desarrollo Alternativo en México*. eds. E. Leff y J. Carabias, Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades – Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Conacher, A. 1980. Environmental problem-solving and land-use management: a proposed structure for Australia. *Environmental Management* 4:405-491.
- Comisión de Recursos Naturales del Distrito Federal. 1999. Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, México D.F.
- Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de Teledetección Espacial. Rialp. Madrid.
- Dixon, J. y P. Sherman. 1990. *Economics of Protected Areas: A New Look at Benefits and Costs*. Earthscan Publications. Londres.
- Eastman, J.R., P.A.K. Kyem y J. Toledano. 1993. *GIS and Decision Making*. UNITAR, Ginebra.
- Edwards, W. y J.R. Newman. 1986. Multiattribute Evaluation. En: *Judgment and Decision Making*. eds. H.R. Arkes y K.R. Hammond. Cambridge University Press. Nueva York, N.Y.

Expert Choice, Inc. 1993. Expert Choice Version 8 : User Manual, Decision Support Software, Inc., McLean, VA.

Gilbert, L. 1979. Food web organization and the conservation of neotropical diversity. En *Conservation Biology: An Evolutionary-Ecological Perspective*, eds. M. Soulé y B.A. Wilcox. Sinauer, Sunderland, Massachusetts, pp. 1-13.

Gower, J.C. 1966. Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika*. 53:325-338.

Jankowski, P., A.V. Lotov y D. Gusev. 1999. Application of a multiple criteria trade-off approach to spatial decision making. En *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis*, ed. J.C. Thill, Ashgate Publishing Company. pp.127-148.

Jensen, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall. Nueva Jersey.

Keeney, R.L., y H. Raiffa. 1975. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. John Wiley and Sons. Nueva York, NY.

Krebs, C.J. 1994. *Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. Harper Collins College. Nueva York, N.Y.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1999. Delma, México, D.F.

Loomis, J.B. 1993. *Integrated Public Lands Management, Principles and Applications to National Forests, Parks, Wildlife Refugees and BLM lands*. Columbia University Press, Nueva York, NY.

Longley, P. y M. Batty. 1996. *Spatial Analysis: Modelling in Gis Environment*. GeoInformation International. Nueva York, NY.

Lucas, P.H.C. 1992. *Protected Landscapes: A Guide for Policy-Makers and Planners*. Chapman & Hall. Nueva York, NY.

Lyons, J., S. Navarro-Pérez, P.A. Cochran, E. Santana y M. Guzman-Arroyo. 1995. Index for integrity based on fish assemblages for the of conservation streams and rivers in west-central Mexico. *Conservation Biology* 9:569-583.

Maguire, L.A. 1986. Using decision analysis to manage endangered species populations. *Journal of Environmental Management*. 22:345-360.

Maguire, L. 1991. Risk analysis for conservation biologists. *Conservation Biology* 5:123-125.

Malcewski, J. 1999. Spatial multicriteria decision analysis. En *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis*, ed. J.C. Thill. Ashgate Publishing Company. Calgary. pp.77-102.

Malcewski, J., R. Moreno-Sánchez, L.A. Bojórquez-Tapia y E. Ongay-Delhumeau. 1997. Multicriteria group-decision making model for environmental conflict analysis in the Cape Region, Mexico. *Journal of Environmental Planning and Management* 40:349-374.

Margules, C. y M.B. Usher. 1981. Criteria used in assessing wildlife conservation potential: A review. *Biological Conservation* 21:79-109.

Meffe, G.K. y C.R. Carroll. 1997. *Principles of Conservation Biology*. Sinauer, Sunderland Massachusetts.

Ortolano, L. 1997. *Environmental Regulation and Impact Assessment*. John Wiley & Sons. Nueva York, NY.

Peterson, D.L., y D.L. Schmoldt. 1994. A case study for resources management planning with multiple objectives and projects. *Environmental Management* 18:729-742.

Possingham, H.P. 1997. State-dependant decision analysis for conservation biology. En *The Ecological Basis for Conservation :Heterogeneity, Ecosystems and Biodiversity*, eds. S.T.A. Pickett, M. Shachak y G.E. Likens. Chapman & Hall. Nueva York, NY. pp. 298-304.

Provencio, E. y J. Carabias. 1992. El enfoque del desarrollo sustentable: una nota introductoria. En *Problemas del Desarrollo*. Instituto de Ecología -- Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Pulliam,R. 1997. Providing the scientific information that conservation practitioners need. En *The ecological basis for conservation:Heterogeneity,ecosystems and biodiversity.*, editores S.T.A. Pckett, M.Shachak y G.E. Likens. Chapman & Hall. Nueva York,NY. pp. 16-24.

Quattrochi, D.A., y M.F. Goodchild. 1997. *Scale in Remote Sensing and GIS*. Lewis Publishers. Santa Barbara, California.

Ralls, K. y A.M. Starfield. 1994. Choosising management strategy: Two structured decisison-making methods for evaluating the predictions of stochastic simulation models. *Conservation Biology* 1:175-181.

Saaty, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, Nueva York, NY.

Smith, C.L., B.S. Stee, P.C. List y S. Cordray. 1995. Making forestry policy integrating GIS with social processes. *Journal of Forestry* 93:31-36.

Sol, V.M., P.E.M. Lammers, H. Aiking, J. de Boer y J.F. Feenstra. 1995. Integrated environmental index for application in land-use zoning. *Environmental Management* 19:457-467.

Szidarovsky, F., M.E. Gershon y L. Duckstein. 1986. *Techniques for Multiobjective Decision Making in Systems Management*. Elsevier. Nueva York, NY.

Taylor, P. 1977. *Quantitative Methods in Geography*. University of Newcastle. Newcastle.

Wilson, A.G. 1981. *Geography and the Environment*. John Wiley and Sons. Nueva York, N.Y.

ANEXO 1 - PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO

El AHP incluye cuatro pasos principales descritos por Malczewski et al., 1997.

1. Estructura Jerárquica.- Se debe generar una estructura jerárquica para representar el problema de una manera gráfica en términos de la importancia relativa, o prioridad, de los criterios. En 1956 Miller indicó que la mente humana es capaz de considerar siete más menos dos elementos al mismo tiempo. De esta manera, si se restringe el número de elementos o criterios a un máximo de nueve, en cada nivel jerárquico, se asegura la estabilidad de la escala de intervalo en el análisis.
2. Ponderación de los indicadores o criterios de decisión.- El peso relativo de los criterios se determina por los expertos a través de una comparación por pares de los componentes de cada nivel jerárquico. Para v componentes se genera una matriz recíproca $C=[c_{pr}]$; tal que $c_{pr}=1/c_{rp}$ para $p,r=1,2,\dots,v$. La comparación de la importancia relativa del criterio p con respecto al r da un valor de $c_{pr}=w_p/w_r$. El número total de comparaciones es $v(v-1)/2$, ya que la diagonal de la matriz C consiste solo de elementos unitarios. De acuerdo con el AHP, la siguiente escala numérica (y su correspondiente expresado en juicios de valor) mide la importancia de un elemento en una matriz, con respecto de otro: 1 (igual), 3 (moderada), 5 (fuerte), 7 (muy fuerte), y 9 (extremadamente fuerte); los valores pares corresponden a valores intermedios entre juicios adyacentes.
3. Cómputo de los pesos asignados.- La importancia relativa de cada criterio al interior de la escala jerárquica se obtiene por medio del cómputo del eigenvector (dicho enfoque es el más usado y probablemente el más simple). Esto es, el eigenvector $w=(w_1,w_2,\dots,w_v)$ asociado al eigenvalor principal proporciona la mejor estimación de los pesos asignados a cada criterio; formalizando:

$$Cw=\lambda_{\max}w$$

donde λ_{\max} es el eigenvalor principal y w es el eigenvector de la matriz C . Los pesos se interpretan como el promedio de todos los modos posibles de comparar los elementos de la matriz C . Los elementos del eigenvector se normalizan para que: $w_1 + w_2 + \dots + w_v = 1$.

4. Estimación del cociente de consistencia.- Debido a la naturaleza humana, las comparaciones por pares pueden resultar inconsistentes en estricto sentido matemático (esto es, no cumplen con la condición $c_{pr} \times c_{rt} = c_{pt}$), es decir, que al criterio r le fue asignado un valor de importancia mayor que al criterio s , y a s mayor que t , pero r fue considerado menos importante que t .

Sin embargo, para matrices recíprocas positivas $\lambda_{\max} \geq v$, y $\lambda_{\max} = v$ si C es una matriz consistente. Consecuentemente, mientras mayor sea la inconsistencia, mayor será el eigenvalor (por encima de v) y peor el eigenvector para representar todas las combinaciones por pares. Así, la cercanía a la consistencia se estima calculando el índice CI:

$$CI = (\lambda_{\max} - v) / (v - 1)$$

Mientras más cerca esté λ_{\max} de v (o CI de cero) más consistentes serán los juicios, de otra manera indica la existencia de un problema de inconsistencia. Así, el cociente de consistencia, CR, provee una evaluación de la significancia de CI con respecto de un índice al azar, RI, que es el CI promedio de 500 matrices C de comparaciones por pares generadas al azar para v criterios. Por lo tanto:

$$CR = CI / RI$$

Si $CR \leq 0.1$ se cuenta con un nivel razonable de consistencia en la comparación por pares; si $CR > 0.1$ los valores de importancia en la matriz C necesitan revisión.

ANEXO 2 - ANÁLISIS DE APTITUD

Un problema de aptitud de suelo incluye un conjunto de alternativas, representadas por pixeles en una capa temática incluida en un Sistema de Información Geográfica (SIG), las cuales tienen que ser evaluadas dependiendo de los criterios de decisión. El conjunto de pixeles en una base de datos dentro de un SIG, X , con un total de K pixeles, se representa:

$$X = \{x^1, x^2, \dots, x^k\} \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Cada pixel es caracterizado por un conjunto de criterios o variables de decisión I , de manera que cada pixel toma un valor x para cada criterio I , y la variedad de valores posibles en diferentes capas temáticas se define:

$$x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_I^k) \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

Así, la aptitud puede determinarse a partir de un modelo multicriterio, que se define como una combinación lineal ponderada de x valores para cada pixel (Eastman et al., 1993):

$$s^k = \sum_i w_i x_i^k; \quad \forall x_i^k \in X,$$

donde w_i es el peso del criterio i . Más aún, si se considera un conjunto de restricciones, cada pixel se representa:

$$x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_j^k) \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad x = (0, 1), \forall x_j^k \in X,$$

y la aptitud se define como (Eastman et al., 1993):

$$s^k = \sum_i^J w_i x_i^k \prod_j x_j^k$$

donde J es el número de restricciones, $x_i = 0$ si una restricción existe, y $x_i = 1$ si no hay restricciones.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**