

Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida "Los Petenes", Campeche, México

Jean-François Mas^{*}
Jorge Correa Sandoval^{**}

Recibido: 23 de agosto de 1999
Aceptado en versión final: 9 de mayo de 2000

Resumen. Los bosques tropicales sufren rápidos procesos de deforestación y de fragmentación que tienen, entre otras consecuencias, la desaparición de numerosas especies vegetales y animales, es decir, una pérdida de biodiversidad. En la región de "Los Petenes", estado de Campeche, México, la vegetación forestal se distribuye en islotes, llamados *petenes*, constituyendo un paisaje fragmentado de origen natural. Con base en el cálculo de índices matemáticos, se llevó a cabo una caracterización de los patrones de fragmentación en esta zona y se clasificaron los petenes en diferentes categorías. Se discutió la utilidad de los índices utilizados para el estudio del paisaje en la región. Se observó que los petenes presentan una gran variedad en cuanto al tamaño, a la forma y al grado de aislamiento, por lo que constituyen zonas particularmente interesantes para estudiar las relaciones entre fragmentación de los hábitats y biodiversidad.

Palabras claves: Ecología del paisaje, biodiversidad, índices de fragmentación, sistemas de información geográfica.

Analysis of landscape fragmentation in the "Los Petenes" protected area, Campeche, Mexico

Abstract. Tropical rainforests are undergoing rapid deforestation and fragmentation processes which have led to the extinction of many plant and animal species, that is, to a loss of biodiversity. In the "Los Petenes" region located in the Campeche State, Mexico, the forest vegetation is distributed as islands, called *petenes*, constituting a naturally fragmented landscape. A characterization of fragmentation patterns was carried out through the calculation of mathematical indices, and petenes were classified into various categories. The utility of the indices applied for studying the landscape in this region was discussed. It was found that petenes display a considerable variation in size, shape and degree of isolation. For this reason, they constitute particularly interesting areas for studying the relationship between habitat fragmentation and biodiversity.

Key words: Landscape ecology, biodiversity, indices of fragmentation, Geographic Information Systems.

INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales sufren procesos de deforestación muy rápidos (FAO, 1997). La deforestación no se traduce solamente en una disminución del área forestal, tiene también como consecuencia la parcelación de las superficies residuales, es decir, la fragmentación. En un paisaje forestal fragmentado, las áreas forestales forman parches rodeados por una matriz de tierras agrícolas u otras formas de uso del suelo. La fragmentación modifica las condiciones medioambientales y el funcionamiento de los ecosistemas alterando el régimen hidrológico, el ciclo de los elementos minerales, el microclima y las propiedades de los suelos (Forman, 1994). La fragmentación de los hábitats en parches separados conduce

a la reducción de las poblaciones, de los intercambios y de los procesos de inmigración. Estas modificaciones se traducen en la pérdida o el desplazamiento de la biodiversidad (Estrada y Coates, 1994; Lauga y Joaquim, 1992; McIntyre, 1995; Saunders *et al.*, 1991; Turner, 1996). Numerosos estudios demostraron que el impacto de la parcelación de los hábitats sobre la biodiversidad depende de los patrones de fragmentación. Por ejemplo, se mostró que la abundancia de ciertas especies está relacionada con el tamaño y el grado de aislamiento de los parches de vegetación (Estrada y Coates, 1994; McIntyre, 1995; Robbins *et al.*, 1989; Schieck *et al.*, 1995). Otros estudios mostraron que la fragmentación a través de la multiplicación de los límites entre diferentes ecosistemas, per-

^{*} Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México, D. F. E-mail: jfmas@igir.igeograf.unam.mx

^{**} Colegio de la Frontera Sur, ECOSUR, Unidad Chetumal, Parque Industrial No. 6, Carretera Chetumal-Bacalar, Quintana Roo, México.

turba los organismos afines a las condiciones interiores, y en cambio, puede favorecer a otras especies (Lynch, 1992; Stouffer y Bierregaard, 1995). Revisiones de los efectos de la fragmentación sobre la biodiversidad pueden encontrarse en Forman (1994), Saunders *et al.* (1991) y Turner (1996), entre otros. Con el fin de caracterizar los patrones de fragmentación, se desarrollaron herramientas matemáticas, llamadas índices de fragmentación, que permiten evaluar algunos aspectos de ésta como el tamaño, la forma, la diversidad, la distribución espacial y los grados de aislamiento y de conectividad de los parches (FAO, 1995; Forman, 1994; Jeanjean *et al.*, 1994; Turner y Gardner, 1991).

La mayoría de los paisajes altamente fragmentados son producto del desarrollo de las actividades humanas. Sin embargo, existen paisajes fragmentados de origen natural como la región de "Los Petenes", ubicada en la costa noreste del estado de Campeche, entre la ciudad capital que lleva el mismo nombre y Celestún (Figura 1). Esta región es un gran pantano que cubre un área aproximada de 1 300 km² (Rico-Gray, 1982). Su característica más notable es la presencia de islas de vegetación arbolada (manglar o selva) inmersas en una matriz de vegetación herbácea, de manglar o de selva estructuralmente más bajos. Estos islotes de vegetación (Figura 2), generalmente asociados a un afloramiento de agua dulce o al relieve, tienen el nombre de *petenes*, vocablo maya que significa "campos llanos junto al mar a manera de islotes" (Olmsted y Durán, 1988; Rico-Gray, 1982). Los petenes se distribuyen en todo el borde de la península de Yucatán, pero son particularmente abundantes en la porción centro-oriental de Quintana Roo y en el noroeste del estado de Campeche. Se les encuentra igualmente al sur de Florida, en la región de los *Everglades*, donde se les denomina *hammocks* (Olmsted *et al.*, 1980) y en la Ciénaga de Zapata, Cuba (Rodríguez, 1992). La distribución de la vegetación forestal en islas confiere al paisaje un estado de fragmentación natural.

La región de "Los Petenes" mantiene una biodiversidad relativamente importante. Dentro de la biota, la avifauna (residente y migratoria) es el grupo más conspicuo: se registraron 193 especies de aves, tanto residentes como migratorias, de las cuales 65 están señaladas en la *Norma Ecológica-049 del Diario Oficial de la Federación*, en alguna categoría de protección (Mas *et al.*, 2000). Se reportaron también en la zona mamíferos silvestres en peligro de extinción como el jaguar (*Panthera onca*), el ocelote (*Leopardus pardalis*), el tigrillo (*Leopardus wiedii*) y el mono araña (*Ateles geoffroyi*), entre otros. Una gran parte de la región fue declarada "Zona Especial de Protección de Flora y Fauna Silvestre y Acuática" en 1996 (EPOMEX, 1996) y Reserva de la Biosfera en 1999 (*Diario Oficial del 24-5-99*).

Los objetivos del presente estudio son: a) analizar y cuantificar los patrones de fragmentación natural en el área protegida "Los Petenes"; b) evaluar los índices para caracterizar el paisaje en la región, y c) evaluar qué tan importante e interesante sería llevar a cabo un estudio sobre las relaciones entre los patrones de fragmentación y la biodiversidad en esta región.

MATERIALES Y MÉTODOS

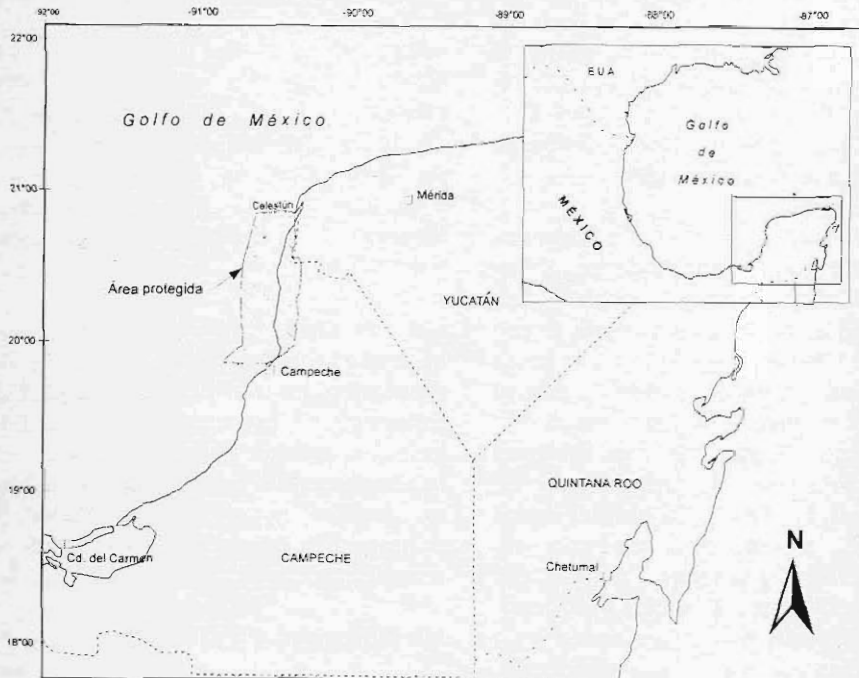
Mapa de vegetación

Con base en la interpretación visual de fotografías aéreas escala 1:75 000, obtenidas en 1991, se elaboró el mapa de uso del suelo y vegetación de la zona de "Los Petenes", correspondiente a Campeche. Las clases utilizadas fueron: blanquizal, marisma de gramíneas y ciperáceas, manglar, selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia y petén. El blanquizal se refiere a la franja palustre generalmente sin cubierta vegetal conformada por intrusiones salinas. La marisma de gramíneas y ciperáceas (pantano de zacate) se encuentra en áreas planas que se inundan y está formada por asociaciones de pastos dominadas por *Cladium jamaicensis* (saibal), *Typha dominguensis* (tule) o *Phragmites australis* (carrizo). En el petén la

altura de la vegetación es mayor que la vegetación periférica. Generalmente está formado por elementos de manglar y de selva.

Los polígonos determinados durante el proceso de fotointerpretación fueron corregidos geoméricamente a fin de compensar las deformaciones de las fotografías. Con el fin de compensar la falta de puntos de referencia en

los mapas topográficos, se utilizaron imágenes de satélite (Welch y Madden, 1999). En una etapa siguiente, los polígonos se digitalizaron para integrarlos en la base de datos de un sistema de información geográfica. El mapa digital representa la distribución de los diferentes tipos de vegetación y uso del suelo de la región, en particular de las islas de vegetación "petenes".



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Localización del área protegida "Los Petenes", Campeche.

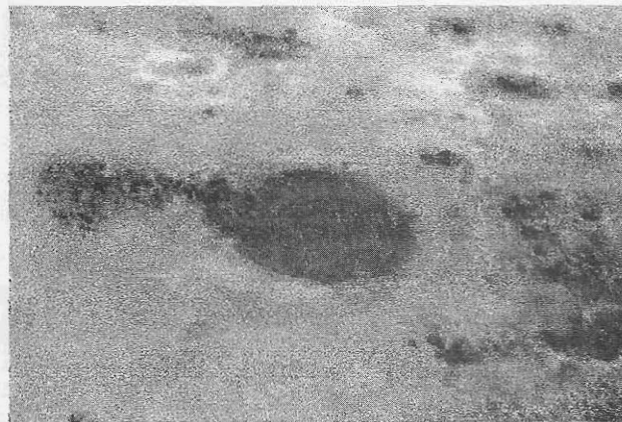
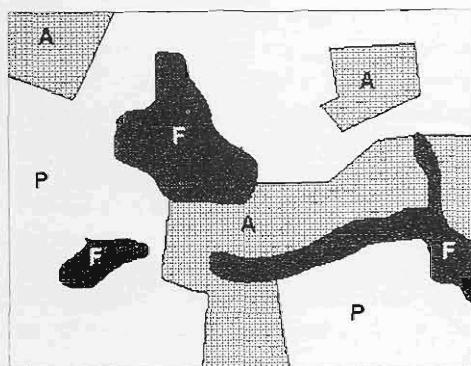


Figura 2. Petén (vista aérea oblicua).

Caracterización de la fragmentación

El análisis de los patrones de fragmentación del paisaje se llevó a cabo a través del cálculo de índices de fragmentación, utilizando el programa FRAGSTATS (McGarigal y Marks, 1994) y programas desarrollados en ARC/INFO. El paisaje se considera como un mosaico de elementos o parches (Figura 3). Los índices describen la fragmentación del paisaje caracterizando cada parche (su tamaño, forma, aislamiento) y la totalidad del paisaje (proporción y arreglo espacial de los elementos que lo componen). En este estudio se analizó la fragmentación de los hábitats forestales distribuidos en los *petenes* y ubicados dentro del Área Protegida Estatal "Los Petenes". En una primera etapa se caracterizó cada petén, luego se analizó la fragmentación al nivel del paisaje.



A: Agricultura; F: Uso Forestal; P: Pastizal

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Paisaje en mosaico de parches.

Caracterización de los petenes

En un primer paso, se consideraron solamente los parches de petenes, sin tomar en cuenta los tipos de vegetación que los rodean. Se caracterizó a cada petén mediante la aplicación de índices que permiten evaluar su tamaño, forma y grado de aislamiento.

Se determinaron la superficie y el perímetro de cada petén. La forma de los petenes se estimó a través de dos índices. El primero, llamado índice de forma (IF), se basa en el cociente

perímetro / superficie (ecuación 1). Evalúa la complejidad de la forma de un parche comparándolo con un parche estándar circular de misma superficie. Toma el valor 1 para una forma circular y aumenta a medida que la forma del parche es más compleja.

$$IF = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot S}} \quad (1)$$

donde IF = índice de forma; p = perímetro y S = superficie.

El segundo índice es la dimensión fractal (DF). Originalmente, ésta describe una relación invariable en la escala de observación, entre el perímetro y la superficie de un objeto como lo indica la ecuación 2 (Mandelbrot, 1977).

$$p = K \times S^{DF/2} \quad (2)$$

donde DF = dimensión fractal; p = perímetro. S = superficie y K es una constante que depende del objeto.

La ecuación 3, equivalente a la 2, expresa el valor de la dimensión fractal (DF) en función del perímetro p, de la superficie S y de la constante K.

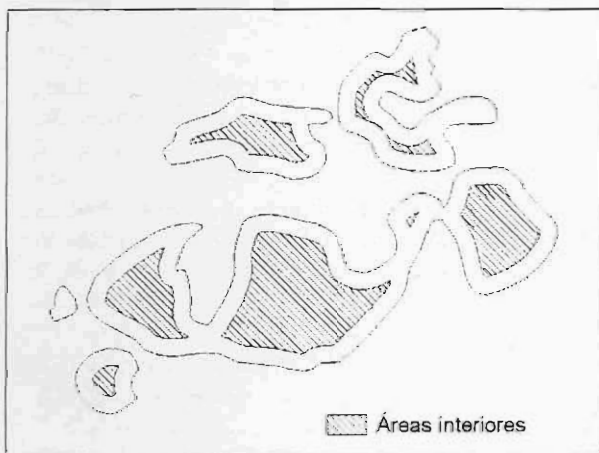
$$DF = \frac{2 \times (\ln(p) - \ln(K))}{\ln(S)} \quad (3)$$

La constante K se determina llevando a cabo la regresión del logaritmo del perímetro contra el logaritmo de la superficie. Gráficamente, $\ln(K)$ se determina como la ordenada al origen entre la pendiente de la regresión, es decir, el valor de $\ln(p)$ cuando $\ln(S)$ es igual a cero. En el algoritmo utilizado por el programa FRAGSTATS se considera que $K = 1$, es decir, que $\ln(K) = 0$ (ecuación 4).

$$DF = \frac{2 \ln(p)}{\ln(S)} \quad (4)$$

La dimensión fractal toma valores entre 1 y 2. Valores cercanos a uno indican formas geométricas sencillas. Los valores se acercan a 2 conforme las formas se vuelven más complejas.

Se utilizaron también algunos índices para la caracterización del área interior de un parche. Ésta se define como la superficie del parche ubicada a cierta distancia de los límites exteriores (Figura 4), es decir, la zona que no está afectada por los efectos de borde. El área interior de los petenes se definió como la situada a más de 150 m de los bordes. Se eligió este valor porque se observó que la influencia exterior era considerablemente atenuada y porque varios autores reportaron la presencia de especies afines a las condiciones interiores a esta distancia al interior de parches forestales (Didham, 1997; Robbins *et al.*, 1989). Para cada petén se determinó el número de áreas interiores, la superficie de estas áreas y la proporción de la superficie total ocupada por ellas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Área interior de un parche.

El grado de aislamiento de un parche puede ser sencillamente caracterizado por la distancia al parche vecino más cercano. El programa FRAGSTATS permite también el cálculo de otro índice que toma en cuenta el alejamiento y el tamaño de los parches vecinos. Este índice es igual a la suma de la superficie de los parches vecinos dividida por el cuadrado de la distancia (ecuación 5).

$$PROX = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{d_i^2} \quad (5)$$

donde PROX = índice de proximidad; S_i = superficie del parche vecino i ; d_i = distancia al parche vecino i .

El índice de proximidad se calculó tomando en cuenta los petenes vecinos situados a menos de 8 km del petén considerado, porque ciertas especies silvestres pueden recorrer esta distancia entre diferentes fragmentos forestales (Estrada y Coates, 1994).

Los petenes se clasificaron con base en los índices descritos anteriormente a fin de agruparlos en clases por patrones de tamaño, forma y grado de aislamiento similares. Como los índices presentan unidades de valores muy variadas (superficies, longitudes, números sin dimensión), se centraron y estandarizaron para generar variables sin dimensión de promedio cero y desviación estándar igual a uno (Wannacott y Wannacott, 1972). Estas variables se utilizaron para llevar a cabo un análisis de cúmulos que permite reagrupar los petenes con características similares. Luego se aplicó una clasificación jerárquica para disminuir el número de clases juntando varios cúmulos parecidos en una sola clase final. Como paso siguiente, se tomaron en cuenta los tipos de vegetación o usos del suelo que rodean los petenes. Se determinó cuántos y cuáles tipos de vegetación colindan con cada petén y se afinó su clasificación considerando esta información.

Caracterización de la fragmentación al nivel del paisaje

Los índices a nivel del paisaje permiten caracterizar el conjunto de parches que lo conforman, como por ejemplo, la densidad de parches, la densidad de bordes entre diferentes tipos de parche o la diversidad de elementos presentes en el área, entre otros. Los índices de fragmentación a nivel del paisaje se calculan para una superficie dentro de la cual se supone que las condiciones son homogéneas. Esto facilita los cálculos pero deja de ser válido cuando se estudian superficies grandes y/o heterogéneas. Por esta razón, se calculó el valor de los índices para áreas reducidas de la zona en estudio por

medio de "ventanas". O'Neill *et al.* (1996) sugieren el uso de ventanas dos a cinco veces más grandes que las unidades del paisaje a fin de evitar sesgos en el cálculo de los índices. Para cada ventana se calcularon: a) la densidad de borde (longitud de borde / unidad de área) y b) el índice de diversidad de Simpson. La densidad de borde se calculó con base en los límites entre parches forestales (petenes y selvas) y no forestales (manglares, marisma de gramíneas y ciperáceas, blanquizales). Se consideró a la matriz de manglar como no forestal, porque presenta una altura inferior a 4 m. Se tomaron igualmente en cuenta los bordes formados por las carreteras. El índice de diversidad de Simpson es la probabilidad de que dos puntos seleccionados al azar estén ubicados en parches de clase diferente (McGarigal y Marks, 1994):

$$IS = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (6)$$

donde IS es el índice de diversidad de Simpson, y p_i es la proporción del área del paisaje ocupada por el tipo de parche i .

El índice de Simpson varía entre 0 y 1. Es igual a cero cuando el paisaje contiene solamente un parche (no hay diversidad) y se acerca a uno cuando el número de tipos de parches aumenta y la distribución del área entre los diferentes tipos es más homogénea.

Los valores de cada uno de los dos índices fueron asignados al punto central de la ventana y se interpolaron para obtener una representación de la variación espacial de estas variables.

RESULTADOS

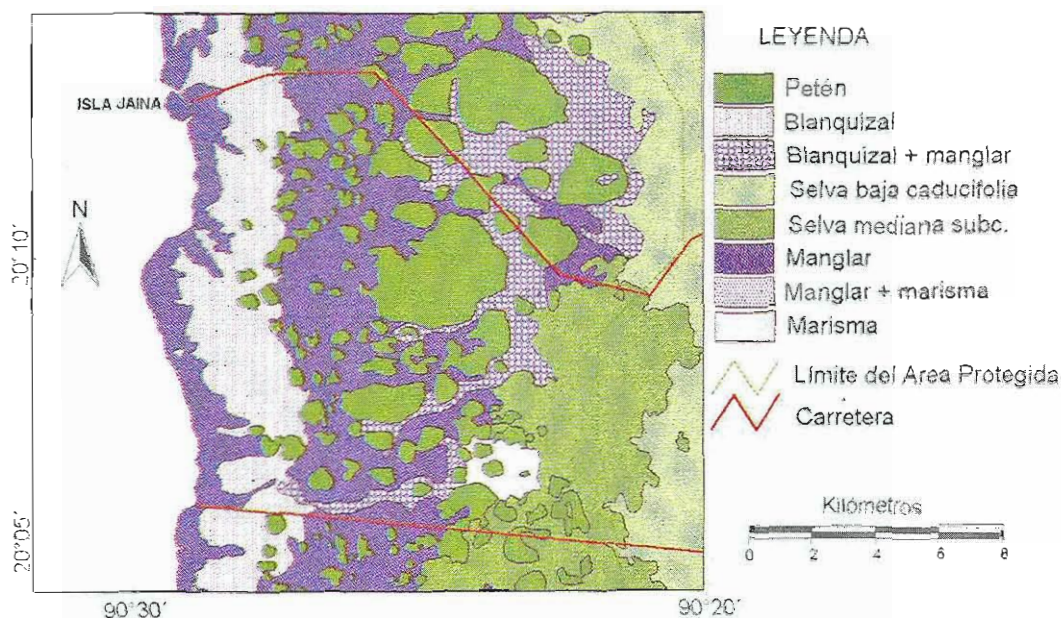
Por lo plano de la zona, las fotografías presentan pocas distorsiones geométricas; el problema principal fue la falta de puntos de referencia en los mapas topográficos que tenía como consecuencia desfases en la cartografía preliminar elaborada con anterioridad (EPOMEX, 1996). La localización de puntos de referencia complementarios en imágenes de satélite Landsat MSS corregidas

geométricamente permitió subsanar este problema. La comparación de puntos localizados en el terreno con GPS y la información del mapa permitió corroborar que este último tiene una precisión satisfactoria, con desfases menores a 80 m. Debido a la escala de las fotografías aéreas, los elementos cartografiables más pequeños tienen un área de aproximadamente media hectárea, de tal manera que los petenes de menor área no están representados en el mapa. El mapa de uso del suelo y vegetación (Figura 5) fue integrado en la base de datos de un sistema de información geográfica ARC/INFO. Con base en este mapa, se calculó la superficie de cada tipo de vegetación y tipo de uso del suelo para el área protegida (Cuadro 1).

Ciertos tipos de cubierta, como el manglar, la marisma de gramíneas y ciperáceas y el blanquizal, están muy mezclados, de manera que se utilizaron clases como "manglar + marisma" o "blanquizal + manglar". La superficie cubierta por asociaciones de manglar cubre más de 62 000 ha (50% de la parte terrestre del área protegida). Las selvas, fuertemente perturbadas por las actividades humanas (quemadas), se localizan en la parte oriental del área protegida y ocupan una superficie de 20 000 ha (16% del área protegida). En la región hay aproximadamente 1 000 petenes que forman cerca de 800 parches de vegetación, de los cuales 755 se ubican dentro del área protegida de "Los Petenes", Campeche y, la mayor parte restante, en la reserva de Celestún, Yucatán. La vegetación de petenes ocupa alrededor del 12% del área protegida, una superficie parecida a la de las marismas de gramíneas y ciperáceas y las de blanquizales.

A fin de computar la dimensión fractal con la ecuación 3, se calculó el valor de la constante K para los petenes. Para ello, se llevó a cabo la regresión del logaritmo del perímetro ($1n(P)$) contra el logaritmo de la superficie ($1n(S)$) para todos los petenes (Figura 6). La ecuación de la línea de regresión es $1n(p) = 0.55 \times 1n(S) + 0.8042$, de manera que cuando $1n(S) = 0$, $1n(p) = 1n(K) = 0.8042 \Rightarrow K = 2.23$. El Cuadro 2 presenta los valores promedio, mínimo y máximo, así como la desviación estándar de

los índices de fragmentación de los petenes de la dimensión fractal calculada con base en del área protegida. Se presentan los valores de la ecuaciones 3 ($k = 2.23$) y 4 ($k = 1$).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Mapa de uso del suelo y vegetación.

Cuadro 1. Superficie y número de parches de los tipos de cubierta en el área protegida "Los Petenes", Campeche

Tipo de cubierta	Núm. de parches	Superficie (ha)	Porcentaje del total
Manglar + palmar + arenas	2	726	0.6
Manglar	25	28 789	22.9
Manglar + marisma	7	25 860	20.6
Blanquizal + manglar	8	7 033	5.6
Blanquizal	62	11 603	9.2
Marismas	10	16 039	12.8
Selva baja caducifolia	9	8 226	6.6
Selva mediana subcaducifolia	23	11 716	9.3
Petén	755	15 479	12.3
Área urbana (Isla Arena)	1	59	0.0
<i>Total</i>	<i>902</i>	<i>125 530</i>	<i>100.0</i>

Fuente: Elaborado con base en cálculos propios.

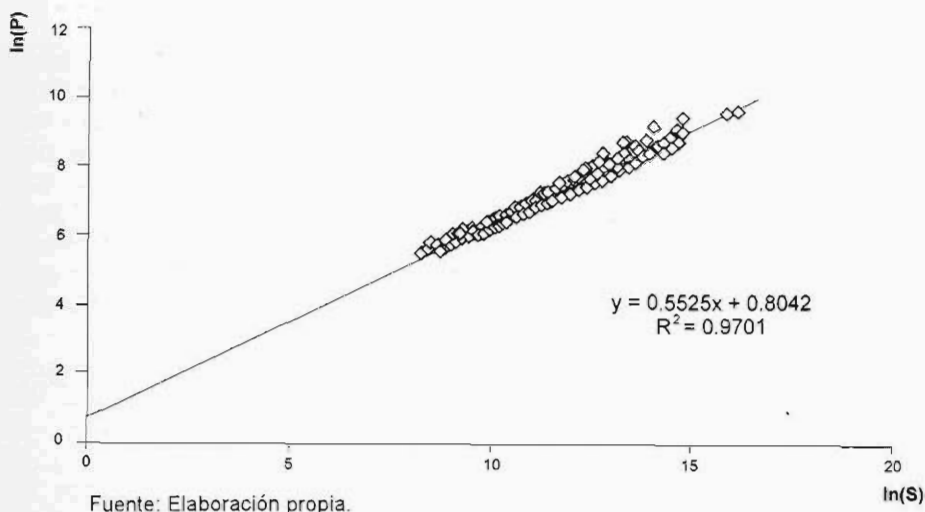


Figura 6. Regresión del logaritmo del parámetro (1nP) contra el logaritmo de la superficie (1nS).

Cuadro 2. Estadísticas e índices de fragmentación de los petenes

Índice	Promedio	Desv. estándar	Mínimo	Máximo
Superficie (ha)	20.5	57.3	0.4	1077.0
Perímetro (m)	1588	1480.8	235	16330
Índice de forma	1.16	0.17	1.00	2.49
Dimensión fractal con K = 1	1.25	0.02	1.19	1.35
Dimensión fractal con K = 2.23	1.11	0.02	1.07	1.20
Número de área(s) interior(es)	0.4	0.6	0	4
Superficie del área interior (ha)	5.3	40.8	0.0	848.1
Proporción del área interior (%)	5.1	10.8	0.0	78.7
Distancia al petén más cercano (m)	206.1	269.2	20	2670
Índice de proximidad	95.8	264.3	0.2	3048.5

Fuente: Datos obtenidos con base en cálculos propios.

El cálculo de la dimensión fractal está sesgado por la superficie. Por ejemplo, con base en la ecuación 4, un círculo de una hectárea presenta una dimensión fractal de 1.27, uno de 100 ha, de 1.18 (Cuadro 3).

En realidad la dimensión fractal de un círculo es 1 y no depende de su tamaño (para los círculos $K = 3.54$). La dimensión fractal de los petenes es en promedio de 1.11 y 1.25, de acuerdo con las ecuaciones 3 y 4, respectivamente, y una desviación estándar de

0.02. Las variaciones de círculos de diferente superficie entre una y 100 ha son más importantes que las del valor de la dimensión fractal de los diferentes petenes. La dimensión fractal y el área de los petenes presentan una correlación negativa (coeficiente de correlación de Spearman igual a -0.62 y -0.18 con la DF calculadas con base en las ecuaciones 4 y 3, respectivamente). Eso podría indicar que los petenes más pequeños presentan formas más complejas. Sin embargo, un análisis visual del mapa nos indica que es todo lo contrario: los petenes que presentan formas más complejas son generalmente los más grandes. En consecuencia, es el sesgo inherente al cálculo de la dimensión fractal lo que explica esta correlación negativa: petenes de formas similares presentan una gran variación de su dimensión fractal dependiendo de su área, lo que imposibilita interpretar este índice.

Cuadro 3. Valores de los índices de forma para círculos de diferentes tamaños

Área (ha)	IF	DF (k = 1) (ecuación 4)	DF (k = 2.23) (ecuación 3)
0.5	1.00	1.30	1.11
1	1.00	1.27	1.10
50	1.00	1.19	1.07
100	1.00	1.18	1.07
1 000	1.00	1.16	1.06

Fuente: Elaborada con base en cálculos propios.

A fin de agrupar los petenes en grupos similares en tamaño, forma y grado de aislamiento, se llevó a cabo una clasificación con base en seis de las variables calculadas en la etapa anterior (área, perímetro, porcentaje representado por el área interior, índice de forma, distancia al petén más cercano e índice de proximidad). Se descartaron las variables *a) número de áreas interiores*, porque presenta valores discretos que dividen artificialmente los petenes durante la clasificación, *b) superficie del área interior*, porque está muy correlacionada con el área del petén ($r = 0.97$) y *c) dimensión fractal*, que no fue satisfactoria en

el caso de los petenes, como se señaló anteriormente. Los valores de estos índices fueron estandarizados y luego utilizados como variables en un análisis de cúmulos que permitió determinar 15 clases de petenes. Las características (valores promedios) de los petenes de cada cúmulo están representadas en el Cuadro 4. Se puede observar que algunos petenes tienen características únicas. Se trata, por ejemplo, de los petenes de los cúmulos 13 y 14 cuyas extensiones son muy superiores a los demás o a los petenes de los cúmulos 3 y 5, que presentan un índice de proximidad muy elevado. Un solo cúmulo reagrupa 451 petenes y los cuatro cúmulos más grandes reúnen a casi 93% de los petenes.

Como paso siguiente se llevó a cabo una clasificación jerárquica, que consiste en reagrupar sucesivamente entre sí los cúmulos más parecidos, con el fin de reducir el número de clases. El árbol de reagrupamiento (Figura 7) sugiere definir cinco clases de petenes aglutinando entre ellos a los cúmulos 3 y 11; los cúmulos 1, 2, 4, 6, 7, 9, 10, 12 y 15, y los cúmulos 13 y 14. En esta clasificación en cinco categorías, 98 % de los petenes corresponde a una sola clase. La Figura 8 representa los petenes clasificados para una porción del área protegida.

Posteriormente, se determinaron para cada petén los tipos de vegetación circundante. Para ello, se simplificó la clasificación de vegetación reagrupando los tipos de cubierta similares, para finalmente considerar cuatro tipos de matriz: *a) manglares*, *b) marisma de gramíneas y ciperáceas*, *c) blanquiales* y *d) selvas*. La mayoría de los petenes (83%) están inmersos en una matriz de un solo tipo. Sin embargo, se pueden observar petenes que colindan con dos o tres tipos de vegetación diferentes (Cuadro 5).

Tomando en cuenta los tipos de vegetación que rodean a cada petén, se puede subdividir a las cinco clases definidas por las clasificaciones. Por ejemplo, los petenes correspondientes a la clase que reúne a la mayor parte de los mismos, pueden encontrarse en

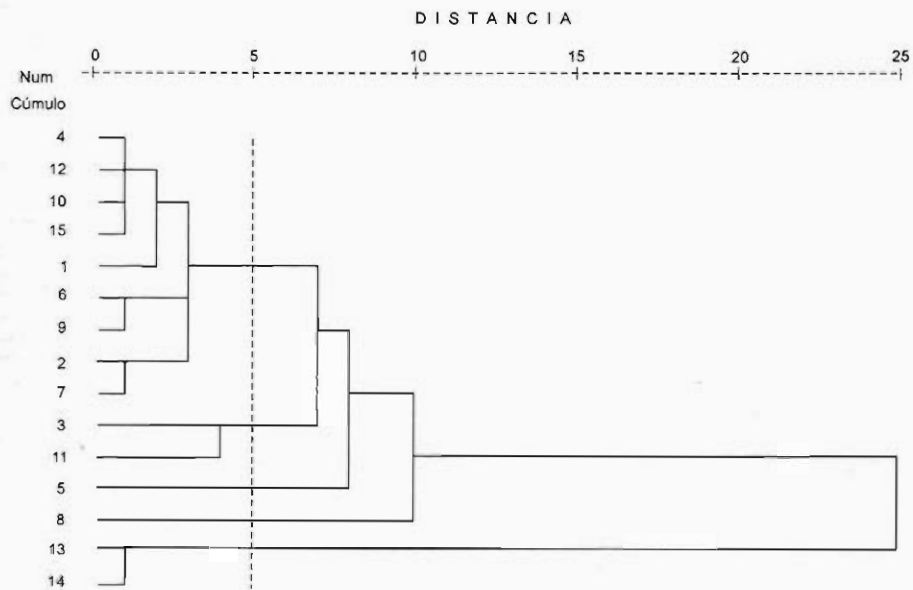
una matriz de blanquizar, de marisma de gramineas y ciperáceas, de manglar o de selva.

Cuadro 4. Características de las 15 clases de petenes

Número del cúmulo	1	2	3	4	5	6	7
Número de petenes	16	2	1	451	1	14	9
Área (ha)	22.3	44.0	10.9	7.2	17.6	160.4	91.0
Perímetro (m)	1649	4098	1234	982	1729	5841	6611
Área interior (% del área total)	11.3	1.2	0.6	0.6	3.8	48.4	13.3
Índice de forma	1.13	1.78	1.06	1.1	1.16	1.33	1.98
Dist. petén más cercano (m)	40	25	2035	141	60	108	61
Índice de proximidad	1322.0	1133.4	2035.3	43.9	3048.6	312.3	266.9

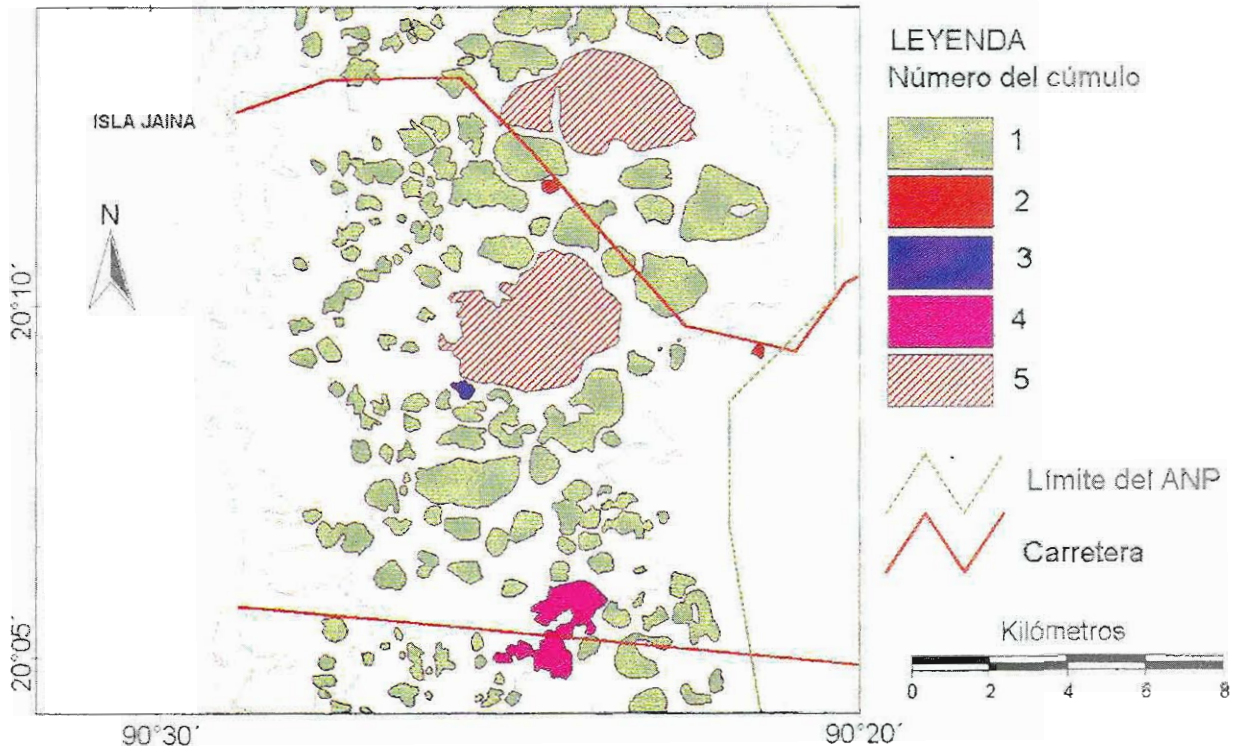
Número del cúmulo	8	9	10	11	12	13	14	15
Núm. de petenes	1	1	88	6	82	1	1	81
Área (ha)	278.7	242.6	23.3	17.1	11.6	1077.0	850.4	38.5
Perímetro (m)	13949	9562	2349	1539	1243	16330	15404	2512
Área interior (%)	35.6	45.2	2.8	7.4	4.0	78.8	73.9	21.4
Índice de forma	2.36	1.73	1.41	1.09	1.11	1.4	1.49	1.15
Dist. petén más cercano (m)	60	42	128	2129	633	60	108	138
Índice de proximidad	213.0	752.3	73.7	1.0	3.9	338.9	323.5	107.7

Fuente: Elaborado con base en cálculos propios.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Árbol de reagrupamiento de la clasificación jerárquica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Petenes clasificados en función de las variables de fragmentación.

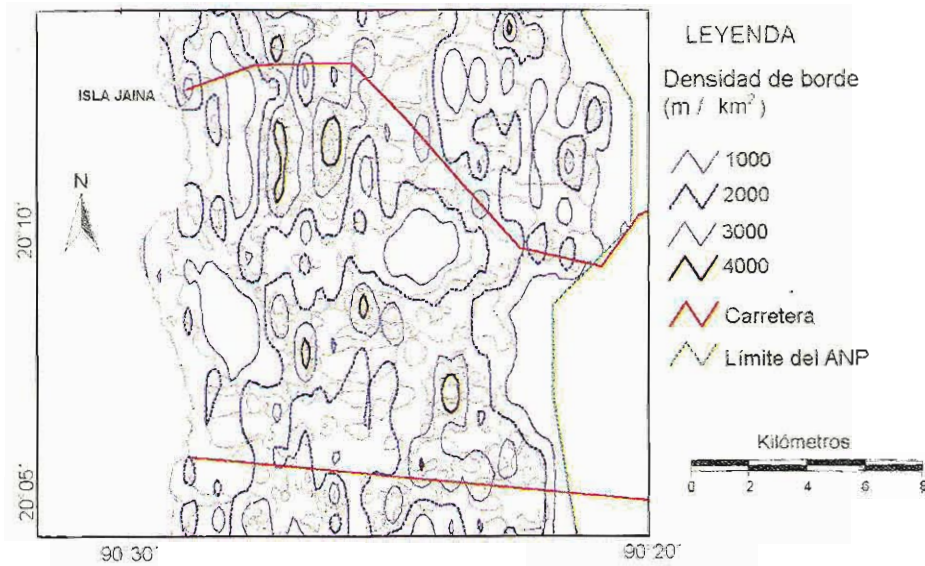
Cuadro 5. Tipos de vegetación adyacentes

Número de parches limitrofes	Número de petenes por tipo de matriz				Total
	M	M.G.C.	S	B	
1	411	178	29	7	625
2	M y M.G.C.	B y M	S y M.G.C.	M y S	
	73	28	10	16	127
3	M, S y M.G.C.	B, M y S			
	2	1			3

B: blanquiazal; M: manglar; M.G.C.: marisma de gramíneas y ciperáceas; S: selva
Fuente: Elaborado con base en cálculos propios.

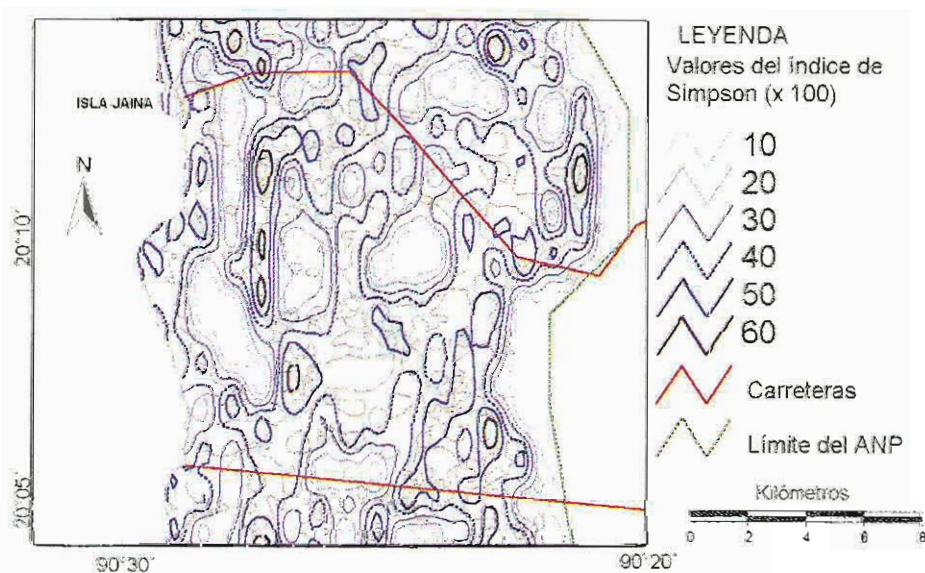
Los índices a nivel de paisaje se calcularon utilizando ventanas de 1 km/1 km, lo que corresponde aproximadamente a cinco veces el promedio de la superficie de los petenes. Las Figuras 9 y 10 representan la variación espacial de la densidad de bordes y del índice de

Simpson. Se puede observar que ambas variables presentan variaciones importantes en el espacio. Ciertas zonas presentan un gran número de tipos de cobertura y de borde forestal / no forestal, mientras que otras zonas son más homogéneas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Variación espacial de la densidad de bordes (isolíneas).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Variación espacial del índice de Simpson (isolíneas).

DISCUSIÓN

A continuación se discuten la utilidad y la interpretación de los índices de fragmentación respecto a cinco aspectos principales: a) área, b) forma, c) bordes y áreas interiores, d) aislamiento y e) diversidad.

Área

La superficie de los petenes individuales en el área protegida varía entre 0.5 y más de 1 000 ha. El área promedio es de 20 ha aproximadamente. Es importante notar que un gran número de petenes cuya superficie es inferior al área mínima cartografiada no se tomaron en cuenta. Se registraron ocho parches de más de 200 ha que parecen ser, desde el punto de vista de su formación, un conjunto de petenes que forman grandes extensiones de vegetación continua. La superficie de un parche es tal vez el dato más importante y útil en el análisis de un paisaje (McGarigal y Marks, 1994). Durán (1995) mostró que los petenes de mayor superficie presentan mayor riqueza florística y, al igual que otros estudios, que la riqueza de especies de aves y la presencia de algunas especies depende fuertemente del tamaño del parche (Hutto, 1989; Robbins *et al.*, 1989; Estrada y Coates, 1994). Esta tendencia se observó igualmente en los petenes (Correa *et al.*, 1999)

Forma

La dimensión fractal presenta un sesgo con la superficie. La dimensión fractal es la medición a diferentes escalas basada en el concepto de la similitud a través de las mismas. La variable denominada "dimensión fractal" y determinada a partir del cociente perímetro / superficie de los parches presentes en un paisaje observado a una sola escala, no es la dimensión fractal en un sentido estricto. En otras palabras, parches de diferentes tamaños observados a una sola escala se utilizan para substituir los cambios de escala. La constante K debe determinarse por un objeto fractal (observado a diferentes escalas) y no para una mezcla de formas diferentes, como en el caso de los parches de un paisaje (Frohn, 1998). En

consecuencia, la utilización de la dimensión fractal para caracterizar la forma de parches de un paisaje conlleva problemas importantes. El índice de forma resulta ser más sencillo, más fácil de interpretar y mejor fundamentado que la dimensión fractal, para caracterizar la forma de los parches de vegetación. Este índice parece particularmente apropiado para los petenes, pues éstos presentan generalmente una forma casi circular. El índice presenta así el alejamiento a la forma de petén estándar circular. Con base en este índice, se puede observar que los petenes son generalmente redondos (índice de forma cercano a 1), pero algunos presentan formas más complejas (índice superior a 2). Sin embargo, los petenes no alcanzan la complejidad de los parches forestales remanentes en un paisaje parcialmente deforestado (Frohn, 1998; Mas, 1998).

Área interior y bordes

La extensión del área interior depende del tamaño y de la forma de los parches, así como de la distancia utilizada para determinar el efecto de borde. Definiendo el área interior a partir de una distancia de 150 m adentro del petén, la mayor parte de éstos (470) no presentan área interior, 257 presentan una sola área interior y 28 entre dos y cuatro áreas interiores. El porcentaje de la superficie, representado por el área interior, permite determinar si en el petén predominan las condiciones interiores o de borde. En cambio, el número de áreas interiores se consideró como una medida un poco artificial, ya que el efecto de borde disminuye progresivamente con la distancia hacia el interior del parche, mientras que el índice toma valores discretos. Por ejemplo, en la Figura 11 se puede observar que, cuando se incrementa la distancia para determinar el ancho del borde, el número de áreas interiores varía entre uno y cinco.

El mapa de la variación de la densidad de bordes (Figura 9) muestra áreas con pocos de ellos, que corresponden a extensas áreas homogéneas, como petenes grandes, selva o blanquizales, y otras regiones, en cambio, presentan una gran densidad de bordes. Varios estudios mostraron que los bordes están más

expuestos a la acción del viento y del sol y, que en ellos hay una evapotranspiración y una amplitud térmica más importantes que en el área interior (Turner, 1996). Ciertas especies son afectadas negativamente por los bordes. Por ejemplo, Burkey (1993) observó una depredación de nidos más importante en los bordes que en el interior de los bosques tropicales de Belice y México. En campo se observó que algunos petenes presentan una transición progresiva entre la matriz y el petén, mientras que en otros esta transición es muy abrupta. Es también importante notar que los petenes extensos presentan áreas donde la vegetación es más baja, es decir, que en realidad existen bordes dentro de regiones consideradas en este ejercicio como homogéneas.

Aislamiento

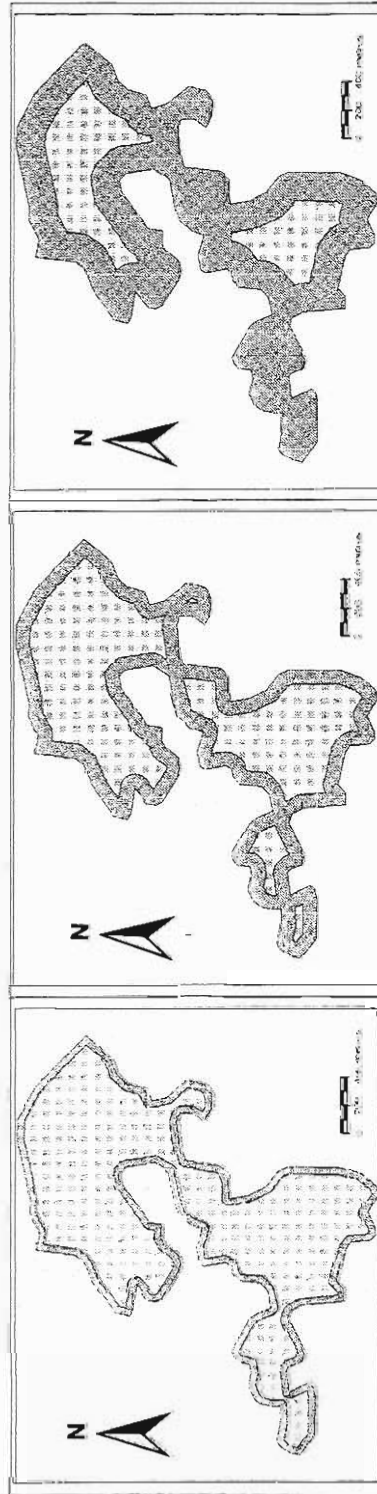
La distancia al petén más cercano es, sin duda, una información valiosa, ya que se ha demostrado que los fragmentos forestales selváticos aislados contienen menos especies que fragmentos del mismo tamaño localizados más cerca de otros parches forestales (Estrada y Coates, 1994). Sin embargo, se tendría que tomar en cuenta el tipo de matriz para tener una idea real del aislamiento del petén. Es probable que un petén ubicado en una matriz de blanquizar no presente el mismo grado de aislamiento que un petén en una matriz de manglar. Esta noción de aislamiento depende en gran medida de las especies estudiadas: ciertas matrices pueden ser obstáculos imposibles de cruzar para algunas especies y no para otras. En la región estudiada, la distancia al petén más cercano es generalmente del orden de unos cientos de metros, pero existen cerca de 20 petenes localizados a más de un kilómetro del petén más cercano (Cuadro 2).

En cuanto al índice de proximidad, su interpretación es delicada, pues refleja a la vez la distancia a los petenes vecinos y su tamaño (ecuación 5). Cuando la distancia al petén vecino disminuye a la mitad, el valor del índice,

que depende del inverso de la distancia al cuadrado, se multiplica por cuatro. En el caso de petenes muy cercanos, las variaciones del índice pueden carecer de sentido desde el punto de vista de su interpretación ecológica. Por ejemplo, si dos petenes vecinos están separados por una distancia de 50 o de 100 m, ¿existe en ella una diferencia en la distribución de la fauna?

Diversidad

La diversidad a la cual se refiere el cálculo del índice de Simpson es la diversidad de tipos de cubierta. En el mapa que representa la variación espacial del índice de diversidad de Simpson (Figura 10) se pueden observar áreas con una alta diversidad de cubiertas. Esta heterogeneidad en el paisaje resulta en parches más pequeños y, en consecuencia, en un menor número de especies que requieren de las condiciones interiores de parches extensos. En cambio, especies afines a las condiciones de borde o que necesitan más de un ecosistema, se favorecen (Forman y Godron, 1986). Otras zonas, que corresponden a grandes extensiones de un solo tipo de cubierta, presentan, por tanto, una baja diversidad, pero pueden constituir el hábitat de especies cuyo requerimiento es una superficie importante de un tipo de hábitat. La región de los petenes presenta una gran diversidad de aves: existe un listado de 295 especies susceptibles de presentarse en el área (Correa y De Alba, 1996). Muestreos de avifauna (Mas *et al.*, 2000) permitieron compilar 193 especies, entre las cuales se encuentran aves acuáticas y otras consideradas especies típicas de selvas, como algunos carpinteros (*Campephilus guatemalensis*, *Piculus rubiginosus* y *Celeus castaneus*) o el faisán (*Crax rubra*). Esta diversidad de aves se explica por el mosaico de diferentes tipos de hábitats existente en esta región y también por el hecho de que existen áreas extensas de un solo tipo de hábitat.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Número de áreas interiores según la distancia que determina el ancho del borde.

CONCLUSIÓN

Este estudio muestra que las islas de vegetación, conocidas como *petenes*, constituyen un hábitat naturalmente fragmentado y presentan una gran diversidad en cuanto al tamaño, a la forma, al grado de aislamiento y al tipo de matriz. El arreglo espacial y la variedad de tamaño de las unidades del paisaje generan extensas áreas homogéneas y otras donde se observa un mosaico de diferentes tipos de cubierta en superficies reducidas.

La mayoría de los estudios sobre fragmentación y biodiversidad se llevan a cabo en medios antropizados, donde la fragmentación es debida a la deforestación. Este enfoque puede presentar algunas limitaciones. En primer lugar, los patrones de fragmentación son recientes y cambian a menudo, lo que puede dificultar la evaluación del impacto de la fragmentación sobre la biodiversidad. Por ejemplo, se reporta un efecto temporal de sobrepoblación en los parches remanentes después de la pérdida de hábitats (Forman y Godron, 1986). Este efecto podría interpretarse erróneamente como un incremento de la riqueza y abundancia de especies. Otra limitación se debe a la dificultad de discernir el efecto de la fragmentación de la influencia de las actividades humanas que la acompañan (intrusión de humo en los parches, ruido, etc.). Por estas razones, el estudio de un paisaje fragmentado natural es una alternativa prometedora.

Por sus características de paisaje únicas y su importante biodiversidad, la región de "Los Petenes" constituye un excelente laboratorio natural para desarrollar estudios sobre el impacto de la estructura y de la fragmentación del paisaje en la biodiversidad, así como para poner a prueba hipótesis relacionadas con la teoría de biogeografía de las islas de MacArthur y Wilson (1967). Los autores llevan a cabo tal estudio en el ámbito del proyecto *Fragmentación de hábitats y evaluación de la biodiversidad en la región de "Los Petenes", Campeche*, que comprende, además de un análisis detallado de la

estructura del paisaje, una caracterización de la vegetación y un muestreo intensivo de avifauna.

AGRADECIMIENTOS

La elaboración del mapa de uso del suelo y vegetación se llevó a cabo con la colaboración de P. Méndez, A. Pérez y G. Palacio. Los programas utilizados para calcular la densidad de borde y para determinar los tipos de matriz que rodea cada petén fueron escritos respectivamente por G. Cuevas y P. Hurvitz. Las figuras fueron elaboradas por R. Zetina. La imagen de satélite provino del proyecto *Caracterización del Paisaje de América del Norte* y fue proporcionada por el Instituto de Geografía, UNAM. El trabajo de campo contó con el apoyo de A. De Alba, F. Tafoya, M. Tuz y P. Zamora. Este estudio se llevó a cabo en el ámbito del proyecto *Fragmentación de hábitats y evaluación de la biodiversidad en la región de "Los Petenes", Campeche*, financiado por la Comisión Nacional para la Conservación y el Uso de la Biodiversidad (CONABIO), en el Centro EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche.

REFERENCIAS

- Burkey, T. V. (1993), "Edge effects in seed and egg predation at two neotropical rainforest sites", *Biological Conservation*, no. 66, pp. 139-143.
- Correa Sandoval, J. y A. De Alba Bocanegra (1996), "Fauna Terrestre Aves", en *Caracterización ecológica ambiental y de los recursos naturales de la región de Los Petenes en Campeche*, Centro EPOMEX, Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Campeche, julio 4 de 1996, pp. 58-68.
- Correa Sandoval, J. y A. De Alba Bocanegra (1998), "Análisis preliminar de la avifauna de los petenes, Campeche", *Jaina*, vol. 9, núm. 3, pp. 11-13.
- Correa Sandoval, J. y J. García Barrón (1993), "Avifauna de Ría Celestún y Ría Lagartos", en Salazar Vallejo, S. I. y N. E. González (eds.), *Biodiversidad Marina y Costera de México*, Comisión Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, pp. 641-649

- Correa Sandoval, J., A. De Alba Bocanegra y J. F. Mas (1999), "Avifauna en un hábitat naturalmente fragmentado: Los Petenes de Campeche, México", *VI Congreso de Ornitología Neotropical, Sociedad de Ornitología Neotropical*, organizado por el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey y el CIPAMEX, 4-10 oct. 1999, ciudades de Saltillo y Monterrey.
- Diario Oficial del 24/05/99, *Decreto por el que se declara Área Natural Protegida con el carácter de reserva de la biósfera a la región del estado de Campeche conocida como Los Petenes*, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- Didham, R. K. (1997), "The Influence of edge effects and forest fragmentation on leaf litter invertebrates in central Amazonia", en Laurance, W. F. y R. O. Bierregaard Jr. (ed.), *Tropical forest remnants - ecology, management and conservation of fragmented communities*, The University of Chicago Press, pp. 55-70.
- Durán García, R. (1995), "Diversidad florística de los petenes de Campeche", *Acta Botánica Mexicana*, núm. 31, pp. 73-84.
- EPOMEX (1996), *Caracterización ecológica ambiental y de los recursos naturales de la región de Los Petenes en Campeche*, Periódico Oficial del estado de Campeche, segunda sección, 4 de julio de 1996.
- Estrada, A., R. Coates-Estrada (1994), "Las selvas de Los Tuxtlas, Veracruz: ¿islas de supervivencia de la fauna silvestre?", *Ciencia y Desarrollo*, vol. XX, núm. 116, pp. 50-61.
- FAO (1995), "Évaluation des ressources forestières 1990, pays tropicaux", *Études FAO Forêts* no. 112.
- FAO (1997), *State of the world forests 1997*.
- Forman R., T. T. (1994), *Land mosaics, the ecology of landscapes and regions*, University Press, Cambridge.
- Forman R., T. T. y M. Godron (1986), *Landscape ecology*, John Wiley, New-York.
- Frohm R. C. (1998), *Remote sensing for landscape ecology, new metric indicators for monitoring, modeling, and assessment of ecosystems*, Lewis Publishers.
- Hutto R. L. (1989), "The effect of habitat alteration on migratory land birds in a west Mexican tropical deciduous forest: a conservation perspective", *Conservation Biology*, vol. 3, no. 2, pp. 138-148.
- Jeanjean H., C. M., J. Fontes, H. Puig, A. Husson y F. Achard (1994), *Étude de l'interface forêt/non forêt, typologie de la fragmentation du domaine forestier tropical, étude morphologique et catalogue*, contrat no. 5396-93-07 DE ISPF, JRC, Ispra, Italie, pp. 85-87.
- Lauga J., J. J. (1992), "Modelling the effects of forest fragmentation on certain species of forest-breeding birds", *Landscape Ecology*, no. 6, pp. 183-193.
- Lynch, J. F. (1992), "Distribution of overwintering Nearctic migrants in the Yucatán Peninsula, II: Use of native and human-modified vegetation", en Hagan III, J. M. and D. W. Johnston (eds.), *Ecology and conservation of neotropical migrant landbirds*, Smithsonian Institution Press, Washington and London, pp. 178-194.
- MacArthur, R. H. y E. O. Wilson (1967), *The theory of island biogeography*, Princeton University Press, Princeton.
- Mandelbrot, B. B. (1977), *Fractals, form, chance, and dimension*, Freeman, San Francisco.
- Mas, J. F. (1998), "Deforestación y fragmentación forestal en la región de la Laguna de Términos, Campeche: un análisis del período 1974-91", *Memorias de la IX Reunión Nacional SELPER-México* en CD-Rom, archivo te3.doc, Zacatecas, Zac., 8-9 oct. de 1998, <http://epomex.uacam.mx/selp98.htm>
- Mas, J. F., J. Correa, A. De Alba, P. Zamora, A. Pérez, A. Sosa y R. Zetina (2000), Proyecto "Fragmentación de hábitats y evaluación de la biodiversidad en la región de 'Los Petenes', Campeche", reporte final, Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche-CONABIO, México.
- McGarigal, K. y B. J. Marks (1994), *FRAGSTATS, Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, Oregon State University.
- McIntyre, N. E. (1995), "Effects of forest patch size on avian diversity", *Landscape Ecology*, vol. 10, no. 2, pp. 85-99.

- ☞ O'Neill, C., T. Hunsaker, S. P. Timmins, B. L. Jackson, K. B. Jones, K. H. Riitters, J. D. Wickham (1996), "Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale", *Landscape Ecology*, vol. 11, no. 3, pp. 169-180.
- ☞ Olmsted I. y R. Durán (1988), "Aspectos ecológicos de los petenes en Florida, Campeche y Quintana Roo", en *Ecología y conservación del delta de los ríos Usumacinta y Grijalva*, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos-División Regional Tabasco, pp. 517-535.
- ☞ Olmsted, I. C., L. L. Loope y C. E. Hilsenbeck (1980), *Tropical hardwood hammocks of the interior of Everglades National Park and Big Cypress National Preserve*, Rept. T-604, Natl. Park Serv. South Florida Research Center, Homestead.
- ☞ Rico-Gray, V. (1982), "Estudio de la vegetación de la zona costera inundable del noroeste del estado de Campeche, México: Los Petenes", *Biótica* 7(2), pp. 171-190.
- ☞ Robbins, C. S., D. K. Dawson y B. A. Dowell (1989), *Habitat area requirements of breeding forest birds of the middle atlantic states*, Wildl. Monogr. 103.
- ☞ Rodríguez Rubio, J. E. (1992), "Petenes en la península de Zapata, Provincia de Matanzas, Cuba", *Jaina*, 3(4), p. 21.
- ☞ Saunders, D. A., R. J. Hobbs y C. R. Margules (1991), "Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review", *Conservation Biology*, 5 (1):18-32.
- ☞ Schieck, J., K. Lertzman, B. Nyberg y R. Page (1995), "Effects of patch size on birds in old-growth montane forests", *Conservation Biology*, 9(5):1072-1084.
- ☞ Stouffer, P. C. y R. O. Bierregaard Jr. (1995), "Effects of forest fragmentation on understory hummingbirds in Amazonian Brazil", *Conservation Biology*, 9(5):1085-1094.
- ☞ Turner, I. M. (1996), "Species loss in fragments of tropical rain forest: a review of the evidence", *Journal of Applied Ecology*, no. 33, pp. 200-209.
- ☞ Turner, M. G. y R. H. Gardner (eds.; 1991), *Quantitative methods in landscape ecology*, Springer, New York.
- ☞ Wanacott, T. H. y R. J. Wanacott (1972), *Statistique*, Ed. Economica, Paris.
- ☞ Welch, R. y M. Madden (1999), "Mapping the everglades", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 65, no. 2, pp. 163-170.