

Evaluación espacial de ambientes de borde para el diagnóstico de bosques fragmentados

C. Granados Peláez¹, D. Serrano Giné², A. García-Romero¹

¹ Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México, D.F.

² Departamento de Geografía, Facultad de Turismo y Geografía, Universitat Rovira i Virgili, C. Joanot Martorell 15, C. P. 43480, Vila-seca, Tarragona, España.

cgranadospelaez@comunidad.unam.mx, david.serrano@urv.cat, agromero@igg.unam.mx

RESUMEN: El estudio del efecto de borde se considera clave para entender los impactos de la fragmentación en la degradación de hábitats forestales. Con el objetivo de evaluar la extensión y el impacto del efecto de borde a escala de paisaje, se seleccionaron 29 fragmentos con distintos atributos espaciales (tamaño, forma y aislamiento) de un bosque de pino-encino próximo a la Ciudad de México. En cada caso se estableció un transecto desde el borde hacia el centro del fragmento (2m de diámetro y longitud variable, de entre 50 a 250m), para el levantamiento de 24 variables de la vegetación. Los levantamientos revelaron un gradiente ambiental borde-interior que impacta significativamente las variables relacionadas con la composición florística (abundancia, riqueza y diversidad), las cuales fueron utilizadas para dimensionar y cartografiar los ambientes de borde e interior, así como para evaluar el efecto de borde a escala de paisaje. El ambiente de borde (≤ 50 m) presenta valores altos de composición, con preferencia por especies latifoliadas cosmopolitas (*Prunus serótina*, *Quercus crassipes* y *Q. rugosa*). El ambiente de interior (> 100 m) muestra valores bajos de composición, con preferencia por especies de bosques maduros (*Quercus crassifolia*, *Q. obtusata* y *P. montezumae*). Entre estos dos ambientes se encuentra uno de transición con solapamiento de especies.

Palabras-clave: Efecto de borde, Gradiente ambiental borde-interior, Atributos espaciales, Escala de paisaje.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las afectaciones de mayor interés en paisajes fragmentados son los cambios que manifiestan los fragmentos forestales en sus franjas exteriores, también llamadas bordes (edges) (Murcia 1995; Hilty et al., 2006). Los bordes son zonas de contacto que se forman entre dos entidades – comunidades vegetales o cubiertas del suelo – distintas en composición y estructura; este contacto genera marcadas diferencias ecológicas (Murcia, 1995; Cadenasso et al., 2003). El efecto de borde supone la aparición de nuevas propiedades y dinámicas, que a la postre convierten a los bordes en hábitats diferentes de los que existen en el interior de los fragmentos o en la matriz adyacente (Hansson, 2000; Cadenasso et al., 2003).

En los últimos años se ha incrementado el interés por determinar los impactos biológicamente significativos del efecto de borde en paisajes forestales fragmentados (Ewers et al., 2010). Mientras que algunos estudios centran su atención en la respuesta de los organismos a las condicionantes ambientales de los bordes (Murcia, 1995; Oosterhoon y Kapelle, 2000; Ries et al., 2004; Harper et al., 2005), otros se enfocan en la estructura espacial de los fragmentos y su relación con las comunidades conservadas en su interior (Tabarelli et al., 1999; Broadvent et al., 2008; Šalek et al., 2013). Por el contrario, escasean las investigaciones centradas en la influencia de los atributos espaciales en los bordes forestales (Echeverría et al. 2007, Ewers et al. 2010), así como en las variables de vegetación más afectadas (Cadenasso et al. 2003, Montenegro y Vargas 2008).

Esta investigación se articula en torno a dos objetivos principales: (i) Detectar y caracterizar áreas de borde e interior a partir de la composición y estructura de árboles y arbustos en bosques de pino-encino, y (ii) Evaluar el impacto del efecto de borde en fragmentos forestales, a escala de paisaje. Para ello partimos de dos hipótesis: (i) el efecto de borde en fragmentos forestales provoca cambios en la composición y la estructura de árboles y arbustos a través del gradiente borde-interior; (ii) el impacto del efecto de borde en el

paisaje está controlado por la dimensión de los fragmentos, de tal manera que los fragmentos de mayor dimensión tienen más probabilidad de contener áreas de núcleo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La investigación toma lugar en bosques templados del centro de México. El cinturón volcánico del centro mexicano alcanza alturas superiores a los 2500m y desniveles de más de 1500m; la temperatura media anual es de 2° a 18°C y la precipitación media anual entre 1000 y 1200mm, hecho que favorece la formación de varios pisos de vegetación. El estudio se centra en bosques de pino-encino (*Pinus teocote* y *P. pseudostrobus* con *Quercus crassipes*, *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Q. lanceolata* y *Alnus firmifolia*), que forman masas compactas en laderas medias (de 2800 a 3100 msnm) en la sierra de Monte Alto, a escasos kilómetros del área urbana de la Ciudad de México (Rzedowski, 1978; Sánchez, 1980). Este territorio es un ejemplo representativo de áreas cercanas a grandes ciudades con importantes presiones de tipo ambiental y social, que incentivan dinámicas de deforestación (Galicia y García-Romero, 2007). La inspección de imágenes Landsat de 1972 y 1982 revela la permanencia de determinados fragmentos forestales durante los últimos 30 años, hecho que avala su idoneidad para el estudio de cambios en la vegetación asociados al efecto de borde (Figura 1).

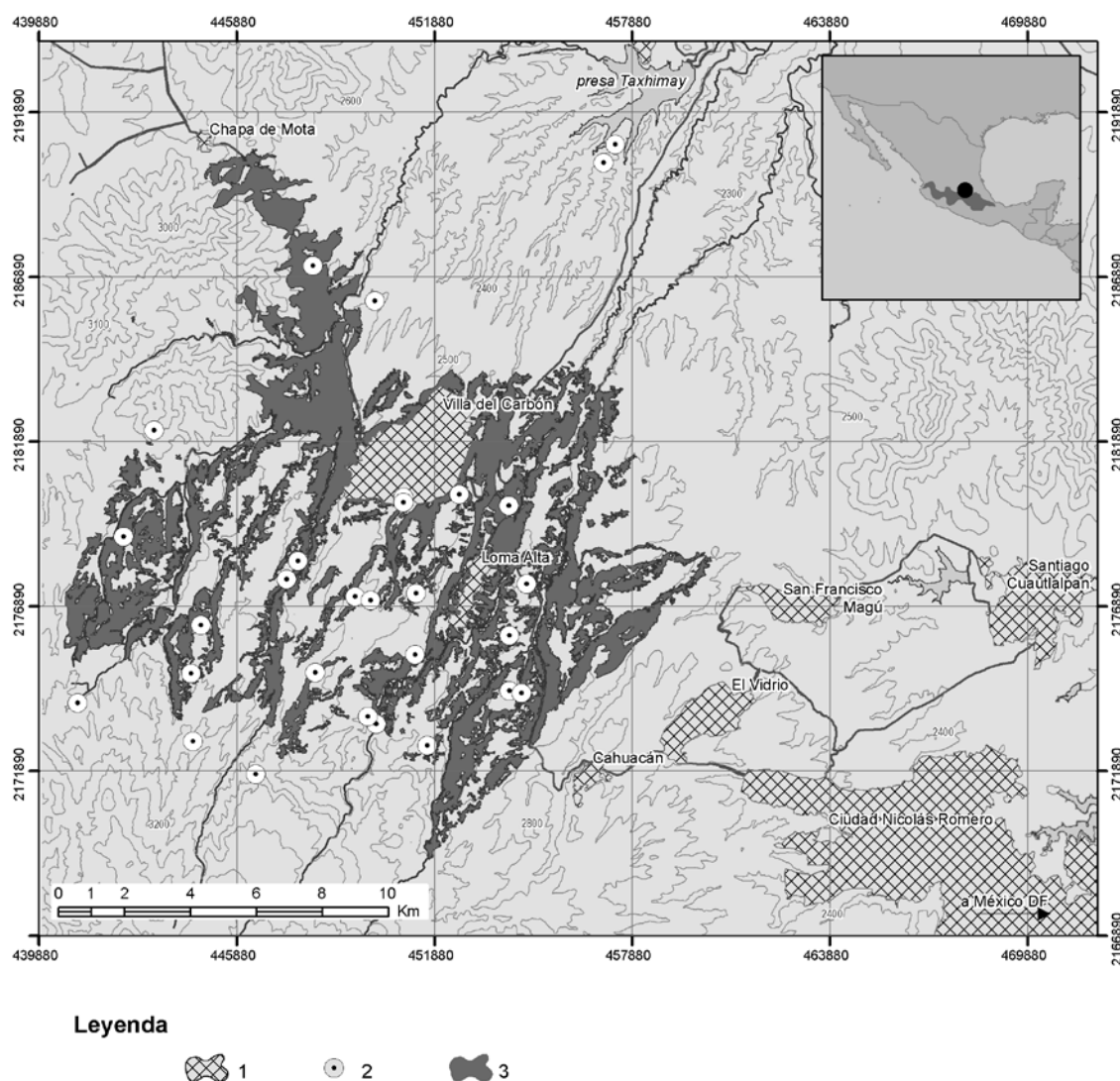


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la sierra de Monte Alto, NE de la Ciudad de México. Se muestra la distribución del bosque de pino-encino y de las áreas de muestreo utilizadas en el estudio. Leyenda: 1: núcleo urbano; 2: área de muestreo; 3: bosque de pino-encino.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico atendió al diagnóstico del efecto borde y a su caracterización. Para ello se realizó un tratamiento estadístico y cartográfico de los datos tomados en campo.

3.1. Cartografía y diagnóstico

La cartografía y el diagnóstico del bosque de pino-encino se realizaron tomando un cuadrante de 692 km² en la vertiente norte de la Sierra de Monte Alto. Se cartografiaron los fragmentos forestales (83,3 km²), considerando una antigüedad mínima de 30 años y atendiendo a una superficie mínima cartografiable de 1Ha. La fuente de información fueron imágenes Landsat de 1982 y del geoservidor Google EarthTM, de 2011. La digitalización se realizó en pantalla, utilizando campos de entrenamiento. Para medir la exactitud de la clasificación se elaboró una matriz de confusión, que relaciona los datos obtenidos mediante digitalización y los muestreados en campo (Congalton y Green, 1999). El análisis de la fragmentación consideró tres métricas básicas: a) tamaño; b) índice de forma de Patton – o relación perímetro-área, siendo 1 para formas circulares o regulares y >1 para formas complejas o irregulares – (adaptado por Laurence y Yensen, 1991); y c) conectividad – o distancia al fragmento forestal más cercano y de mayor superficie al fragmento nodal –. Las tres métricas se trataron mediante estadística descriptiva. El análisis cartográfico se realizó con ILWIS 3.0 © ITC (2001).

3.2. Muestreo de campo

Se trabajó con 29 fragmentos de bosque de pino-encino (Figura 1), que fueron seleccionados según su grado de representatividad en el conjunto del área de estudio. En concreto se tomaron: a) fragmentos grandes (4 muestras), medianos (14) y pequeños (11), de forma compleja (16), de forma simple (13), conectados (25) y desconectados (4). El tipo de borde (abrupto) y la matriz circundante a los fragmentos (agrícola) son homogéneos en el área de estudio, por lo que no fueron considerados como criterios para la selección del muestreo. Para el levantamiento florístico se utilizó el método de intercepción lineal. Se muestrearon 1397 árboles y arbustos en transeptos borde-interior, de 2 m de ancho y longitud variable (de 50 a 250 m) dependiendo de la dimensión de los fragmentos (Montenegro y Vargas, 2008). Para cada individuo se tomó registro de la especie, la talla (m), la cobertura (diámetros mayor y menor de la copa en m) y el diámetro (m) a la altura del pecho en árboles (DAP) y a la altura de la base en arbustos (DAB) (MOPT, 1992; Hitimana et al., 2004).

3.3. Extensión y caracterización de las áreas de borde e interior

La información vegetal tomada en campo se analizó considerando su pertenencia a una forma de crecimiento (árboles o arbustos) y a un grupo florístico (pinos -todos los individuos arbóreos pertenecientes al género *Pinus*-; otros árboles - todos los individuos arbóreos diferentes al género *Pinus* - y arbustos - todos los individuos arbustivos-). Se recabó información referente a 22 variables: 4 referentes a riqueza biológica – de pinos, otros árboles, arbustos y total –, 3 a abundancia – de pinos, otros árboles y arbustos –, 4 a diversidad – índices de Simpson, Shannon-Wiener, Máxima y Equitatividad –, 3 a talla – de pinos, otros árboles y arbustos –, 3 a área basal – de pinos, otros árboles y arbustos –, 3 a cobertura – de pinos, otros árboles y arbustos –, y 2 a dominancia – relación pino-encino y árboles-arbustos-. La información se agrupó en 25 sectores de 10m de longitud contados a partir del borde de los fragmentos. Para estas 22 variables se llevó a cabo un análisis de componentes principales (ACP), que permite establecer las diferencias entre sectores. La extensión de las áreas de borde se estableció mediante un análisis de conglomerados, empleando como variables de entrada a las principales variables de respuesta de la vegetación. Ello permitió agrupar sectores estadísticamente similares, donde los límites entre clústeres fueron interpretados como contactos entre áreas de borde e interior. Dicho procedimiento se realizó mediante el método de agrupamiento jerárquico, con tres clústeres, una medida de distancia euclidiana al cuadrado y una vinculación promedio entre grupos. Para comprobar la significancia dentro de y entre las áreas de borde e interior se realizó un análisis de varianza (ANOVA $F = 103.42$, $p \leq 0.0001$), tomando como variables independientes a las principales variables de respuesta de la vegetación. Se hizo un análisis post-hoc con una prueba de Tukey con objeto de identificar las variables de la vegetación que mejor definen a cada una de las áreas. En último lugar se realizó la caracterización de la composición y la estructura de la vegetación en las áreas de borde e interior mediante estadística descriptiva.

3.4. Diagnóstico del efecto de borde a escala de paisaje

Para determinar el impacto del efecto de borde en los fragmentos forestales, los 333 fragmentos de

bosque se clasificaron en tres categorías, según su estructura interna controlada por la extensión de las áreas de borde e interior. La distribución entre categorías de fragmentos y características espaciales (forma, tamaño y conectividad) se validó con un análisis Chi-cuadrado.

4. RESULTADOS

4.1. Características espaciales y de composición y estructura vegetal

El área de estudio (692 km²) se estructura por una matriz de cultivos (35% de la superficie total) y pastizales (18%). El bosque de pino-encino ocupa 333 fragmentos: 4 de tamaño grande (de 4,2 a 6,6 km²) que representan el 26,5% de la superficie boscosa; 14 de tamaño medio (1,5 a 3,7 km²) que contribuyen con el 37,5%; y 315 chicos (< 1,1 km²) que ocupan el 36% del total. En cuanto a geometría espacial, los fragmentos medianos y chicos están mejor conectados entre sí (15m en promedio) que los grandes (300m en promedio), los cuales forman extensas masas concentradas en los sectores de mayor elevación. El análisis de los índices de forma muestra un equilibrio entre los fragmentos de forma simple (167 fragmentos con IF = 1,12 a 2,72) y los de forma compleja (166 fragmentos con IF = 2,73 a 10,66).

Los 1397 individuos registrados en los fragmentos señalan a los arbustos como el grupo más diverso (diversidad de Simpson = 0,78, H' max = 1,12 y Shannon–Wiener = 0,94), seguido de otros árboles distintos a pinos (diversidad de Simpson = 0,69, H' max = 1,12 y Shannon–Wiener = 0,72) y de pinos (diversidad de Simpson = 0,68, H' max = 0,69 y Shannon–Wiener = 0,68). La equitatividad entre especies es elevada (0,792) y se refleja en la relación entre árboles y arbustos (1 a 1), que mantiene valores similares de riqueza y abundancia (19 y 703 en árboles y 21 y 694 en arbustos, respectivamente). Sin embargo, la estructura del bosque viene dada por la relación entre árboles distintos a pinos y pinos, que es de 6 a 1 (abundancia de 600 y 103, respectivamente). Destacan los individuos arbóreos de los géneros *Abies*, *Arbutus* y *Quercus*, que alcanzan una cobertura superior al 50% y tallas promedio de 6m. La distribución de los pinos resulta opuesta, al formar un dosel abierto (cobertura de 17%), pero con promedios de talla más altos (13m) y menor área basal (0,1m²).

4.2. Respuesta de la vegetación al efecto de borde

De acuerdo al ACP de las 22 variables, la componente 1 (43% de la varianza total) es la que mejor explica los cambios entre los sectores en los que se dividieron los transeptos. Esta componente incluye siete variables: riqueza de otros árboles distintos a pinos, riqueza de arbustos, riqueza total, diversidad de Shannon–Wiener, diversidad máxima, abundancia de otros árboles y abundancia de arbustos (Figura 2).

Los valores más altos de riqueza, diversidad y abundancia se concentran en el borde de los fragmentos, desde donde tienden a disminuir hacia el interior; esta tendencia aparece de forma muy evidente en el caso de la diversidad (DSW y H' max). El resto de variables tiende a reducirse solo los primeros 100 a 150 m desde el borde, tras lo cual vuelven a incrementarse hacia el interior. A excepción de la riqueza de pinos, que obtuvo valores más altos en el núcleo de los fragmentos, en el resto de las variables los valores del interior no alcanzan a los obtenidos en el borde.

4.3. Áreas de borde, transición y núcleo

El análisis de conglomerados para las siete variables de composición demuestra que los cambios observados no son aleatorios, sino que revelan tres tramos con distinto contenido biológico (Figura 3). El área de borde (50m de extensión) comprende los primeros cinco sectores de 10m, que conforman una franja externa de hasta 50m. El área de transición (50m de extensión) comprende los siguientes cinco sectores, y se extiende entre >50 y 100m; y el área núcleo a los sectores posteriores (>100m), con una extensión variable. Si bien las variables de la composición obtuvieron valores parecidos entre las tres áreas (similaridad de 75%), el área de transición muestra una mayor proximidad estadística con el área núcleo (similaridad del 93%). El análisis ANOVA (Tabla 1) muestra que los valores estadísticos (F =103,42) tienen asociados niveles críticos muy pequeños (p < 0,0001), lo cual es coherente con las agrupaciones con similitud estadística en la composición.

El análisis post-hoc de Tukey (Tabla 1) señala que tanto la riqueza total como la de otros árboles distintos a pinos y, también, la de arbustos y otros árboles, presenta diferencias evidentes entre las áreas de borde, transición y núcleo. Además, el área núcleo se define también por la diversidad máxima y la diversidad de Shannon–Wiener, en tanto que el borde lo hace únicamente por esta última.

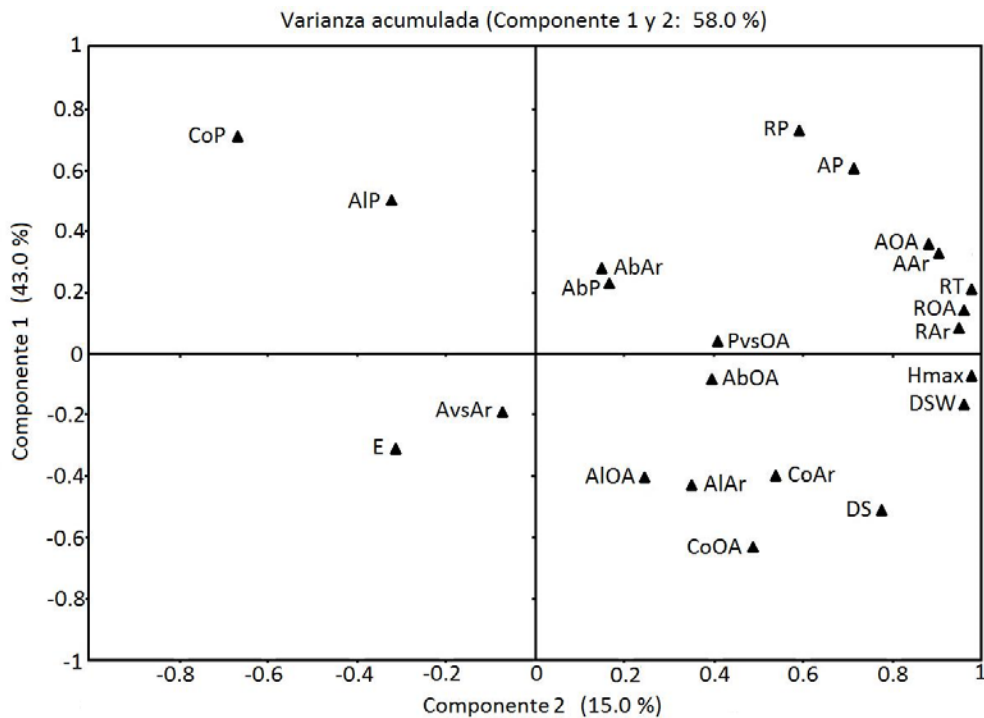


Figura 2. Análisis de componentes principales con 22 variables de composición vegetal y estructura de los bosques de pino-encino. Se utilizan las dos primeras componentes que en conjunto recogen el 58% de la varianza explicada. AP: Abundancia de pinos, AOA: Abundancia de otros árboles, AAr: Abundancia de arbustos, ROA: Riqueza de otros árboles, RAr: Riqueza de arbustos, RP: Riqueza de pinos, RT: Riqueza total, DS: Diversidad Simpson, DSW: Diversidad de Shannon-Wiener, E: Equitatividad, Hmax: Diversidad máxima, AbP: Área basal de pinos, AbOA: Área basal de otros árboles, AbAr: Área basal de arbustos, AIP: Altura de pinos, AIOA: Altura de otros árboles, AlAr: Altura de arbustos, CoP: Cobertura de pinos, CoOA: Cobertura de otros árboles, CoAr: Cobertura de arbustos, PvsOA: Relación pinos-otros árboles y AvsAr: Relación arboles-arbustos.

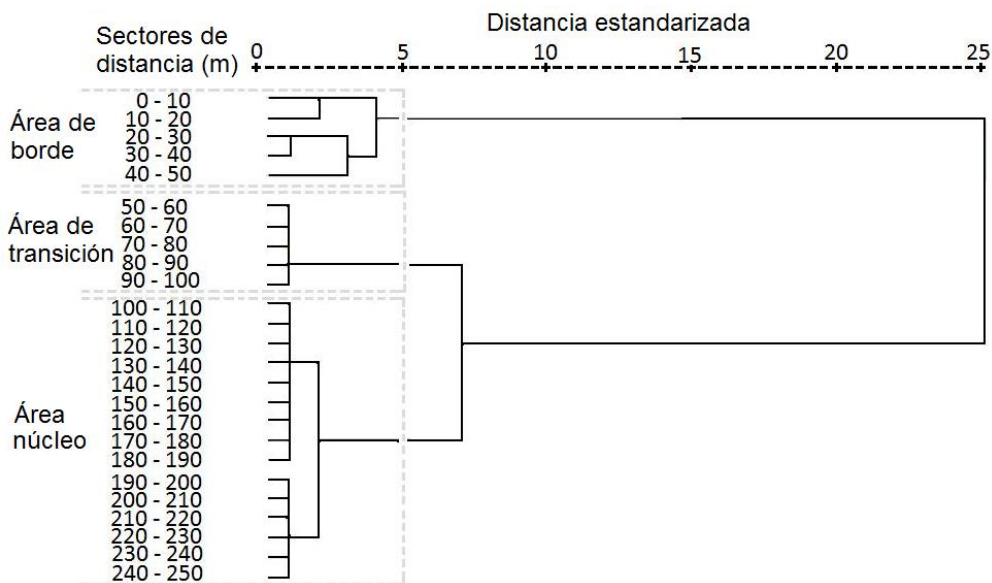


Figura 3. Análisis de conglomerados a partir de la abundancia promedio de 25 sectores de 10 m de extensión en los que fueron divididos los transectos de campo. Se muestra la distribución de los bordes y el área núcleo en 3 clusters de distinta distancia contada desde el borde hacia el interior de los fragmentos.

Tabla 1. Resultados (*p-values*) de ANOVA de las siete variables que forman a la componente composición para las áreas de borde (≤ 50 m), transición (> 50 a 100 m) y núcleo (> 100 m) de los fragmentos de bosque de pino-encino. Los resultados significativos del post-hoc Tukey HSD se muestran con diferente letra. Diferencias significativas al 95%; con 2 grados de libertad para todos los casos.

FUENTE DE VARIACIÓN	Abundancia		Riqueza			Diversidad	
	Arbusto	Otros árboles	Arbusto	Otros árboles	Total	Shannon-Wiener	Máxima
Áreas	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Borde	12,9a	10,3a	3,1a	3,2a	6,8a	1,3a	1,6a
Transición	8,7a	8,7a	1,9a	2,3a	4,6a	1,1ab	1,5b
Núcleo	13,4a	11,6a	2,6a	2,8a	5,9a	1,2a	1,5b

Área de Borde. El margen externo de los fragmentos forestales constituye el área de borde (≤ 50 m). Se trata del sector con mayor riqueza florística y diversidad; en cuanto a abundancia los valores son superiores al área de transición, pero no a la de núcleo (Tabla 1). Las especies arbóreas predominantes son latifoliadas cosmopolitas, o que tienen preferencia por ambientes de borde. En conjunto se trata del 44% de la abundancia de árboles; destaca *Prunus serotina* (13%), *Q. crassipes* (9%) y *Q. rugosa* (9%). Los pinos resultan menos abundantes; destaca *Pinus patula* (7%), que es una especie introducida con finalidades silvícolas, y *P. leiophylla* (4%), que es característica de ambientes perturbados. La mayor parte de especies de arbustos son especialistas en ambientes de borde (74% de las abundancias relativas de los arbustos); los de mayor frecuencia son *Eupatorium glabratum* (43%), *Baccharis conferta* (11%) y *Eupatorium sp.* (8%).

Área de Transición. En este tramo (> 50 a 100 m) la diversidad y las otras variables de riqueza y abundancia son inferiores a las registradas en el tramo anterior (Tabla 1). No obstante, se detecta un porcentaje elevado de árboles que tienen querencia por esta área (62%). Destacan aquellas con preferencia por ambientes de borde, como *Prunus serotina* (8%) y *Cupressus lindleyi* (4%), y por ambientes de interior, como *Q. obtusata* (42%) y *P. teocote* (11%). La misma situación ocurre con los arbustos, donde destacan por sus abundancias relativas *Eupatorium glabratum* (57%) y *Baccharis conferta* (10%), que prefieren ambientes de borde, y *Monnina ciliolata* (9%), propia de ambientes de interior. Desde el punto de vista estadístico, existe mayor similitud con el área núcleo. Ello se debe, en buena medida, al dominio de *Q. obtusata*.

Área Núcleo. Los valores más elevados de abundancia, tanto de arbustos (13,4 individuos por perfil) como de otros árboles distintos a pinos (11,6) se encuentran en el interior de los fragmentos (>100 m) (Tabla 1). Los valores de riqueza florística y diversidad también son más elevados que los del área de transición, aunque son algo inferiores a los encontrados en el área de borde. El análisis de abundancias muestra que los porcentajes más altos corresponden a las especies que tienen preferencia por hábitats de interior. *Quercus obtusata* es la especie arbórea más abundante (38%), seguida por *Q. crassifolia* (25%). Los pinos representan el 12%: *Pinus montezumae* (8%) y *P. teocote* (4%) son los más frecuentes. Los arbustos que muestran preferencia por ambientes de interior suman el 46% de la abundancia total de arbustos. Destacan *Senecio salignus* (19%) y *Gaultheria acuminata* (14%). *Eupatorium glabratum* presenta una proporción inferior (26%) a la obtenida en las áreas de transición y borde.

4.4. Efecto de borde a escala de paisaje

Los 333 fragmentos del área de estudio fueron reclasificados en tres categorías: a) Bosques con área núcleo, estructurados por fragmentos cuya relación tamaño y forma resulta en una distancia borde-interior de > 100 m; b) Bosques con áreas de transición y borde, con una distancia borde-interior de > 50 a 100 m, y que por lo tanto contienen en su interior ambientes de transición y borde, pero carecen de área núcleo; y c) Bosques con área de borde, con una distancia borde-interior de ≤ 50 m, y que por lo tanto corresponden a áreas de borde en su totalidad (Figura 4).

El análisis Chi-cuadrado indica que existen diferencias entre las áreas de borde, transición y núcleo con respecto a las características espaciales: tamaño ($X^2 = 135,041$, $df = 2$, $p < 0,0001$), forma ($X^2 = 78,276$, $df = 2$, $p < 0,0001$) y conectividad ($X^2 = 8,420$, $df = 2$, $p = 0,02$). El 93% de la superficie forestal se refiere a fragmentos de bosque que contienen áreas de núcleo y/o de transición. Se trata de fragmentos comparativamente escasos (41 y 64, respectivamente) y extensos ($1,6\text{km}^2$ y $0,2\text{km}^2$), deformes ($IF = 5,4$ y $3,6$) y distantes entre sí (351 y 34m), que se ubican replegados en los sectores altos de la sierra. El restante 7% de la superficie forestal está repartido en 228 fragmentos pequeños ($0,03\text{km}^2$), de forma regular ($IF = 2,6$) y elevada cercanía entre sí (50,64 m), que están constituidos de manera exclusiva por áreas de borde.

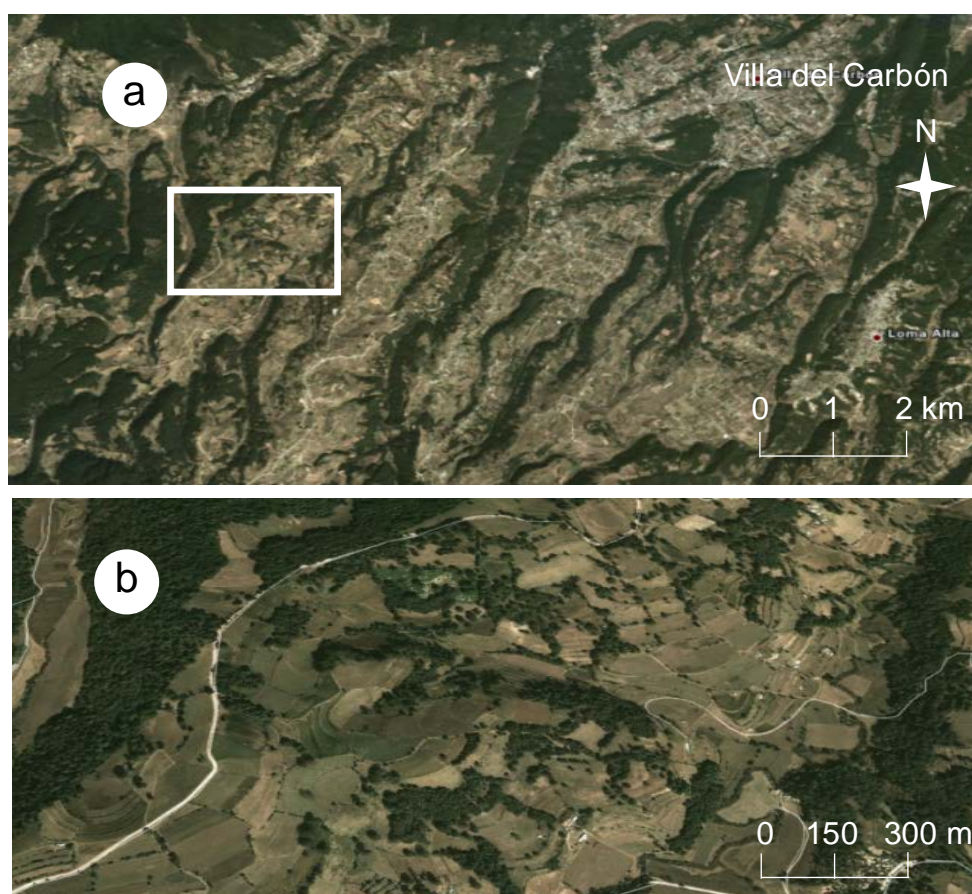


Figura 4. Imágenes de Google Earth del año 2015, mostrando un sector central del área de estudio. En (a) los fragmentos forestales de mayor tamaño representan bosques con área núcleo, donde la relación entre el tamaño y la forma de los fragmentos permite una distancia borde-interior de $> 100\text{m}$. En (b) un detalle de los fragmentos forestales más pequeños clasificados como bosques con área de borde, donde la distancia borde-interior es de $\leq 50\text{m}$.

5. DISCUSIÓN

Existe un número limitado de estudios que se han fijado en la dimensión espacial de los fragmentos forestales (Young y Mitchell, 1994; Cadenasso y Pickett, 2000; Harper et al., 2005; Šalek et al., 2013). El análisis de conglomerados, a partir de 7 variables de composición, revela para el área de estudio tres tramos bien diferenciados según su contenido biológico: área de borde (0 a 50m), área de transición (>50 a 100 m) y área núcleo (> 100 m con una extensión variable). Esta caracterización confirma los trabajos de Montenegro y Vargas (2008) y Delgado et al. (2007), que sugieren la posibilidad de distintas estructuras en un mismo fragmento. De forma similar a otros estudios (Cadenasso y Pickett, 2000; Ries et al., 2004), los valores relativos a estructura de la vegetación resultaron poco significativos.

Los análisis estadísticos han demostrado que el área de borde (≤ 50 m) es la franja de mayor riqueza, diversidad florística y abundancia. Tal como apunta Murcia (1995), ello se debe a que en estos sectores se concentran más recursos tróficos y mayor movilidad y distribución de especies. Experiencias como la de (Hilty et al., 2006) señalan que el incremento de diversidad también se explica por la plasticidad de algunas especies, que logran hacer de estos ecotonos su hábitat principal. En el área de estudio las especies con mayor afinidad por estos ambientes son las latifoliadas, principalmente *Q. crassipes*, *Q. rugosa* y *Prunus serotina*; algunos pinos cultivados (*P. patula*) o de ambientes perturbados (*P. leiophylla*) y especies cosmopolitas, secundarias o arvenses, como *Opuntia ficus-indica* o *Eupatorium glabratum*. Estas especies también tienen una valoración ecológica menor. Tabarelli et al. (1999) detectó resultados similares en bosques montanos tropicales, Honnay et al. (2002) en bosques templados europeos y Oosterhoon y Kapelle (2000) en bosques mefósilos de montaña en Costa Rica. A escala de paisaje cabe decir que los ambientes de borde apenas alcanzan un 7% del conjunto. Sin embargo tienen un gran interés, porque en su mayor parte responden a fragmentos remanentes del bosque; su cercanía a otros fragmentos representa un elevado

potencial de conectividad de cara a la restauración, tal como demuestran trabajos como los de Suárez (2008).

Las áreas de transición y núcleo representan más del 93% del área forestal. El área de transición ofrece valores de riqueza, abundancia y diversidad inferiores a los del borde de los fragmentos, pero la presencia de especies como *Q. obtusata*, favorece la similitud estadística respecto al núcleo. La extensión de esta franja (> 50 a 100 m) resulta particularmente interesante porque difiere de la mayoría de estudios, que la fijan por debajo de 50 m (Young y Mitchell, 1994; Cadenasso y Pickett, 2000; Montenegro y Vargas 2008; Salek et al., 2013).

El área de núcleo aparece a partir de los 100m respecto al margen de los fragmentos. Su principal característica viene definida por valores de riqueza florística y diversidad inferiores a los observados en el área de borde, pero con abundancia de especies autóctonas, como *Q. obtusata*, *Q. crassifolia*, *P. montezumae* y *P. teocote*. A diferencia del trabajo de Ries et al. (2004), las diferencias entre sectores no permiten señalar pérdidas de especies, aunque sí asientan la existencia de especies que se benefician de los procesos de fragmentación –y que, por lo tanto, aparecen con mayor abundancia. Este hecho se ha observado en otras ocasiones (Murcia, 1995; Cadenasso y Pickett 2000; López-Barrera et al., 2007) y confirma la interpretación de Echeverría et al. (2007), según la cual las condiciones del área núcleo son similares a las de bosques bien conservados.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la dimensión espacial del efecto de borde, así como sus consecuencias en la composición y la estructura de fragmentos de bosque de pino-encino.

Se ha demostrado que el efecto de borde afecta sensiblemente a 7 de las 22 variables analizadas: riqueza de otros árboles distintos a pinos, riqueza de arbustos, riqueza total, diversidad de Shannon–Wiener, diversidad máxima, abundancia de otros árboles y abundancia de arbustos. Su distribución espacial permite establecer tres franjas: área de borde (≤ 50 m), área de transición (>50 a 100 m) y área de núcleo (>100 m); la semejanza de las tres es del 75%, pero la de transición tiene una proximidad estadística del 93% con la de núcleo. El área de borde concentra mayor número de especies latifoliadas que la de transición y núcleo; también concentra mayor abundancia de especies con pocos requerimientos o de carácter cosmopolita, como *Prunus serotina*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa*, *Pinus patula* y *P. leiophylla*. Esto contrasta con densidades mayores de otras especies, como *Q. crassifolia*, *Q. obtusata*, *P. montezumae* y *P. teocote*, en el área de núcleo. De ello se infiere mayor calidad ecológica para las áreas de núcleo que para las de borde. A escala de paisaje el 93% de la superficie forestal corresponde a fragmentos con áreas de núcleo y/o transición, es decir, de mayor calidad ecológica; un 7% a fragmentos que contienen exclusivamente áreas de borde, con una distribución dispersa que supone un alto potencial para la conectividad. Esta información es útil para tareas de restauración ambiental.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido financiada con el proyectos PAPIIT IN301414, otorgado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, y con apoyo de la beca Santander Iberoamérica Jóvenes Profesores e Investigadores España 2012.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Broadvent, E., G. Asner, M. Keller, D. Knapp, P. Oliveiray J. Silva. 2008. "Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon". *Biological Conservation*, 141: 1745-1757.
- Cadenasso, M., S. Pickett. 2000. "Linking forest edge structure to edge function: meditation of herbivore damage". *Journal of Ecology*, 88: 31-44.
- Cadenasso, M.L., S.T.A. Pickett, K.C. Weathers y C.G. Jones. 2003. "A framework for a theory of ecological boundaries". *BioScience*, 53/8: 750-759.
- Congalton, G.C. y K. Green. 1999. *Assessing the accuracy of remote sensed data: Principles and practices*. Lewis publishers, Florida, USA. 137 pp.
- Delgado, J., N. Arroyo, J. Arévalo y J.M. Fernández-Palacios. 2007. "Edge effects of roads on temperature, light, canopy cover, and canopy height in laurel and pine forests (Tenerife, Canary Islands)". *Landscape and urban Planning*, 81: 328-340.

- Echeverría, C., Coomes, D., Newton, A., Rey-Benayas, J.M., Lara, A. 2007. "Impacts of forest fragmentation on species composition and forest structure in the temperate landscape in southern Chile". *Global Ecology and Biogeography*, 16: 426-439.
- Ewers, R., C. Marshy O. Wearn. 2010. "Making statistics biologically relevant in fragmented landscapes". *Trends in Ecology and Evolution*, 25: 699-704.
- Galicia, L. y A. García-Romero. 2007. "Land use and land cover change in highland temperate forests in the Izta-Popo National Park, Central Mexico". *Mountain Research and Development*, 27/1: 48-57.
- Hansson, L. 2000. "Landscape and edge effects on population dynamics: approaches and examples". En: Sanderson, J. y L. Harris (ed.). *Landscape Ecology. A top-down approach*: 246. Lewis Publishers, New York.
- Harper, K., E. MacDonald, P. Burton, J. Chen, K. Brosofske, S. Saunders, E. Euskirchen, D. Roberts, M. Jaitehy P. Esseen. 2005. "Edge influence on forest structure an composition in fragmented landscape". *Conservation Biology*, 19 (3):768-782.
- Hilty, J.A., W.Z. Lidicker Jr. y A.M. Merenlender. 2006. *Corridor ecology. The science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*. Island Press, Washington.
- Hitimana, J., J. Legilisho y J. Thairu. 2004. "Forest structure characteristics in disturbed and undisturbed sites of Mt. Elgon Moist Lower Montane Forest, western Kenya". *Forest Ecology and Management*, 194: 269-291.
- Honnay, O., K. Verheyen y M. Hermy. 2002. "Permeability of ancient forest edges for weedy plant species invasion". *Forest Ecology and Management*, 161: 109-122.
- ITC. 2001. *Ilwis 3.0 Academic User's Guide*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, Netherlands. 530 pp.
- Laurence, W. y E. Yensen. 1991. "Predicting the impacts of edge effects in fragmented habitats". *Biological Conservation*, 55: 77-92.
- López-Barrera, F., R. Manson, M. González-Espinosay A. Newton. 2007. "Effects of varying forest edge permeability on seed dispersal in a neotropical montane forest". *Landscape Ecology*, 22: 189-203.
- Montenegro, A.L. y O. Vargas. 2008. "Caracterización de bordes de bosque alto andino e implicaciones para la restauración ecológica en la Reserva Forestal de Cogua (Colombia)". *International Journal of Tropical Biology*, 56: 1543-1556.
- MOPT. 1992. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid. 809 pp.
- Murcia, C. 1995. "Edge effects in fragmented forests: implications for conservation". *Trends in Ecology and Evolution*, 10: 58-62.
- Oosterhoorn, M y M. Kappelle 2000. "Vegetation structure and composition along an interior-edge-exterior gradient in a Costa Rican montane cloud forest". *Forest Ecology and Management*, 126:291-307.
- Ries, L., R. Fletcher, J. Battin y T. Sisk. 2004. "Ecological responses to habitat edges: mechanisms, models and variability explained". *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 35: 491-522.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México. 432 p.
- Šálek, L., D. Zahradnik, R. Marušak, L. Jerabkovay J. Merganica. 2013. "Forest edges in managed riparian forest in the eastern part of the Czech Republic". *Forest Ecology and Management*, 305: 1-10.
- Sánchez, O. 1980. *La flora del valle de México*. Herrero, México. 519 pp.
- Suárez, D. 2008. "Formación de un corredor de hábitat de un bosque montano alto en un mosaico de páramo en el norte del Ecuador". *Ecología Aplicada*, 7 (1,2): 9-15.
- Tabarelli, W. Mantovani y C. Peres. 1999. "Effects of habitat fragmentation on plant guild structure in the montane Atlantic forest of southeastern Brazil". *Biological conservation*, 91: 119-127.
- Young, A. y N. Mitchell. 1994. "Microclimate and vegetation edge effects in a fragmented podocarp-broadleaf forest in New Zealand". *Biological Conservation*, 67: 63-72.