

## Capítulo 1

### Introducción general

Esta tesis aborda el estudio de la deforestación, la fragmentación y la diversidad de comunidades arbóreas en los bosques tropicales montanos de los Altos de Chiapas, en el sureste de México. Esta región es un paradigma de diversidad biológica y cultural (Wolf & Flamenco 2003, González-Espinosa *et al.* 2004) así como un escenario de conflicto entre el desarrollo y la conservación debido a las condiciones socio-económicas desfavorables existentes (Cayuela *et al.* 2005, González-Espinosa 2005).

En el mundo, la actividad humana ha alterado la extensión, el área de distribución y la composición de distintas formaciones vegetales (Houghton 1994, Meyer & Turner 1994, Achard *et al.* 2002, FAO 2005). Los bosques cubren hoy en día algo menos de 4,000 millones de hectáreas, el equivalente a un 30% de la superficie terrestre. De esta superficie total, cerca de 2,000 millones de hectáreas se encuentran repartidas en países en vías de desarrollo, principalmente en regiones tropicales y subtropicales. Aunque el área total de bosque sigue disminuyendo, el ritmo de pérdidas netas es más lento, debido a las plantaciones forestales, la restauración del paisaje y la expansión natural de los bosques (Lamb *et al.* 2005). Así, mientras que la deforestación prosigue a un ritmo de cerca de 13 millones de hectáreas al año, la pérdida anual neta de superficie forestal fue de 7.3 millones de hectáreas anuales -un área más o menos equivalente a la de Andalucía- entre 2000 y 2005 (FAO 2005).

La deforestación se define como la pérdida de cobertura forestal para dar al terreno otros usos tales como agricultura, pastizales, nuevos asentamientos humanos, infraestructura y embalses. La deforestación en los trópicos se reconoce en la actualidad como uno de los problemas ambientales más importantes que encara el mundo hoy día, con serias consecuencias económicas y sociales (Laurance 1999). Los bosques tropicales albergan el 70% de las especies de animales y plantas del mundo, influyen en el clima local y, probablemente mundial (Malhi & Phillips 2004), regulan el caudal de los ríos (Costanza *et al.* 1997), y proveen una amplia gama de productos maderables y no maderables (Arnold & Ruiz Pérez 2001). Los problemas que acarrea la pérdida de estos bosques son impulsados, en países en vías de desarrollo, por el círculo vicioso del crecimiento poblacional y la pobreza persistente (Koop & Tole 2001, Aide & Grau 2004, Ecoespaña 2006).

Desde hace algunos años se reconoce el papel de la fragmentación y degradación del hábitat como responsables del deterioro ecológico de diversos ecosistemas (Saunders *et al.* 1991, Riitters *et al.* 2000, Debinski & Holt 2001). La fragmentación provoca una disminución del tamaño medio de los parches de hábitat y los aísla, y aumenta el llamado efecto 'borde'. La degradación del hábitat, por el contrario, no implica un cambio en la utilización del terreno (FAO 2005). Aunque el terreno sigue siendo de uso forestal, su composición y funciones biológicas quedan comprometidas por la intervención humana. La principal causa de la degradación forestal es la tala de explotación, con el corte selectivo de especies forestales. Ello implica un daño causado en el bosque residual por el derribamiento de árboles, daño al suelo por la construcción de caminos y el arrastre de los troncos y el desplazamiento de diversos organismos. La degradación forestal también ocurre como consecuencia de la recogida intensiva de leña y el sobrepastoreo por el ganado y animales salvajes. Probablemente más de diez millones de hectáreas son degradadas cada año por las acciones de los madereros, recolectores de leña y pastores de ganado. Todo ello aumenta la vulnerabilidad de muchas especies de animales y plantas a condiciones ambientales adversas, pero también ocasiona la creación de nuevos hábitats para otras especies más generalistas (Skole & Tucker 1993, Mace *et al.* 1998).

En esta tesis se investigan cuestiones sobre la respuesta de la diversidad a distintas variables ambientales, físicas y antrópicas, estas últimas relacionadas con los procesos de deforestación, fragmentación y degradación del hábitat, con el incentivo adicional de poder contribuir a mitigar un problema ambiental de suma importancia. Aunque la fragmentación y la degradación del hábitat afectan de manera importante a la diversidad de especies en un rango amplio de escalas espaciales y temporales (Saunders *et al.* 1991, Debinski & Holt 2000), existen muchas dificultades para poder detectar y separar estos efectos de sus procesos causales. Por ejemplo, resulta difícil determinar cuánto del efecto de la deforestación sobre una determinada especie o comunidad de organismos se debe a: (1) la pérdida de hábitat; (2) el aumento del aislamiento de los remanentes de bosque con respecto a otros remanentes; (3) el aumento del efecto borde; (4) la degradación del hábitat forestal. Otro inconveniente a la hora de estudiar los efectos de la fragmentación y degradación del hábitat es que distintos organismos y sistemas ecológicos pueden responder de manera distinta, e incluso contradictoria, a estos procesos (Haila 2002, Henle *et al.* 2004). En consecuencia, es necesario investigar más sobre la escala y el impacto de estos procesos en distintos tipos de bosques.

La tecnología que ofrecen los sistemas de información geográfica (SIG) constituye una herramienta adecuada para el análisis de los patrones espaciales y temporales de deforestación y fragmentación (Chuvieco 2002). La información derivada de mapas digitales y/o imágenes satelitales sirve para: (1) evaluar el impacto de la deforestación y la fragmentación en diversos procesos ecológicos; y (2) generar modelos que permitan extrapolar la información biológica obtenida a una escala local a una escala de paisaje. De esta manera los SIG permiten observar y relacionar patrones y procesos a distintas escalas espaciales.

### *Objetivos de la Tesis Doctoral*

El objetivo general de la tesis fue estudiar el efecto de la deforestación y de la fragmentación del bosque nativo en la diversidad de árboles en bosques tropicales montanos. Este objetivo se abordó a dos escalas espaciales distintas. Por un lado, a escala de paisaje mediante el análisis de imágenes de satélite Landsat con píxeles de resolución de 30x30 m (excepto las imágenes MSS de 1974-75 que tenían una resolución de 60x60 m). Por el otro, a escala de campo mediante la realización de inventarios forestales en parcelas de 1000 m<sup>2</sup>. La información procedente de los inventarios forestales fue posteriormente introducida en un SIG, lo que permitió que esta información se pudiera poner en relación directa con la información procedente de las imágenes de satélite.

Para lograr este objetivo se investigó primeramente el proceso de deforestación y fragmentación del bosque mediante el análisis de una serie temporal de imágenes satelitales (período 1975-2000). En paralelo se analizaron los patrones espaciales de diversidad de las comunidades arbóreas, tanto la diversidad local o diversidad  $\alpha$  como la complementariedad de los tipos de vegetación o diversidad  $\beta$ .

### Objetivos específicos, hipótesis y preguntas

Los objetivos específicos de la tesis fueron:

1. Evaluar un método de clasificación de imágenes de satélite basado en la teoría de la evidencia de Dempster-Shafer que permite combinar la información contenida en las bandas espectrales con la información procedente del conocimiento experto.

- 1.1. Hipótesis. La inclusión del conocimiento experto en la clasificación de tipos de cobertura en paisajes complejos permite mejorar la precisión de la clasificación con respecto a clasificadores tradicionales. Las preguntas que se formularon en torno a esta hipótesis fueron:

- ¿Disminuye el error general en la clasificación Dempster-Shafer en comparación con el de una clasificación de máxima verosimilitud y una clasificación de máxima verosimilitud filtrada por medio de un filtro modal?
  - ¿Disminuye el error de todos los tipos de cobertura definidos?
  - ¿Contribuye todo el conocimiento experto de igual manera a la reducción del error de clasificación total y de cada uno de los tipos de cobertura?
2. Estimar la extensión, la distribución y el grado de fragmentación del bosque nublado o bosque mesófilo de montaña, un tipo de bosque muy diverso y amenazado en Centroamérica. Las preguntas que se formularon en torno a este objetivo fueron:
- ¿Cuál es la extensión y distribución actual del bosque nublado en los altos de Chiapas?
  - ¿Cuántos fragmentos forestales de bosque nublado quedan? ¿Cuál es su área promedio? ¿Qué forma tienen? ¿Cómo están de aislados estos fragmentos unos de otros?
  - ¿Qué papel juegan otros tipos de bosque en el mantenimiento de la integridad funcional y la conectividad de los remanentes de bosque nublado?
3. Analizar los patrones espaciales de deforestación y fragmentación del bosque nativo en un periodo de 25 años (1975-2000).
- Hipótesis 3.1. El bosque nativo ha reducido su extensión en el periodo de estudio de manera significativa. Las preguntas que se formularon fueron:
- ¿Cuáles han sido las tasas de deforestación entre los periodos 1975-1990 y 1990-2000?
  - ¿Cuáles han sido las pérdidas relativas de los distintos tipos de bosque?
- Hipótesis 3.2. En paralelo a la deforestación, se ha producido un proceso de fragmentación del bosque remanente en el periodo de estudio. La preguntas formuladas fueron:
- ¿Ha aumentado el número de fragmentos forestales? ¿Se ha reducido el área promedio de los fragmentos? ¿Y el área núcleo total? ¿Han aumentado la exposición a zonas no forestadas? ¿Ha disminuido la conectividad entre fragmentos?
4. Hacer un modelo de la variación espacial de la diversidad  $\alpha$  y  $\beta$  de árboles. Las preguntas que se formularon fueron:
- ¿A qué factores responde la diversidad  $\alpha$ ?
  - ¿A qué factores responde la diversidad  $\beta$ ?
  - ¿Qué áreas son prioritarias para la conservación teniendo en cuenta tanto la diversidad  $\alpha$  como la  $\beta$ ?
5. Investigar los efectos de la fragmentación y la perturbación antrópica en la diversidad de árboles.
- Hipótesis 5.1. La fragmentación y la perturbación local actúan de manera sinérgica sobre la diversidad de árboles. Las preguntas que se formularon fueron:
- ¿A qué escala se pueden detectar los efectos de la fragmentación y de la perturbación?

- ¿Difieren los efectos de la fragmentación y la perturbación entre distintos tipos de bosque?
- ¿Difieren estos efectos entre especies pioneras y especies asociadas a estadios sucesionales tardíos?

Hipótesis 5.2. La tala de árboles dentro de los fragmentos forestales puede provocar una pérdida de especies a medio o largo plazo. La pregunta concreta que se formuló en torno a esta hipótesis fue:

- ¿Cuántas especies se perderían en cada tipo de bosque si redujéramos el número de individuos a la mitad?

### *Organización de la Tesis Doctoral*

La presente tesis se organiza de la siguiente manera. A este capítulo introductorio (capítulo 1), le sigue el capítulo 2, que describe de manera resumida y en castellano los métodos utilizados. Los siguientes cinco capítulos, del 3 al 7, están en inglés con un resumen en castellano, y se presentan en formato de artículo científico con sus correspondientes secciones de introducción, material y métodos, resultados, discusión y, en la mayoría de los casos, conclusiones. Estos capítulos reproducen los contenidos de artículos en prensa (capítulos 3 y 4) y en revisión (capítulos 5, 6 y 7). Por último, el capítulo 8 presenta las conclusiones generales de esta Tesis Doctoral. Cada capítulo tiene su propia sección de referencias. A continuación describimos el contenido de los capítulos principales.

En el **capítulo 3** se realiza una comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en un área piloto de la zona de estudio que era bien conocida. La información contenida en las bandas espectrales de las imágenes de satélite había demostrado no ser, en muchas ocasiones, suficiente para discriminar con un grado de acierto importante algunos tipos de cobertura forestal, como por ejemplo el bosque de pino con el bosque nublado. *A priori* existían algunas diferencias claras entre los distintos tipos de bosque, como la estratificación altitudinal. Por ello, decidimos incluir esta información con la información espectral a través de un procedimiento de clasificación conocido como Dempster-Shafer. El clasificador Dempster-Shafer permite combinar de una manera formal la información espectral con la información derivada del conocimiento experto. Validamos la clasificación por medio de 137 puntos de verificación y comparamos los resultados con los de una clasificación de máxima verosimilitud y una clasificación de máxima verosimilitud filtrada por medio de un filtro modal.

En el **capítulo 4** se realiza un estudio sobre el estado de conservación de un ecosistema único y de gran valor ecológico, el bosque nublado. Aunque estos bosques se encuentran amenazados a nivel mundial, no existen datos fiables sobre la superficie que ocupan actualmente ni su distribución. Esto impide la elaboración de estrategias de conservación. En este estudio analizamos cuánto bosque nublado queda en los Altos de Chiapas y cuán fragmentado se encuentra en relación a otras formaciones forestales. De esta manera se reconoce de forma explícita el papel de otros tipos de bosque en la conservación de los remanentes de bosque nublado. Para ello se utilizaron los resultados de la clasificación Dempster-Shafer de las imágenes de satélite Landsat ETM+ de 2000 para todo el área de estudio.

En el **capítulo 5** se analizan las tasas de deforestación y los patrones espaciales de fragmentación del bosque nativo en los Altos de Chiapas. Para ello se utilizaron clasificaciones de imágenes de satélite Landsat de 1975 (MSS) y 1990 (TM), además de la clasificación de 2000 utilizada en el capítulo anterior. Las estimas de la superficie ocupada por cada tipo de bosque fueron corregidas utilizando la matriz de confusión obtenida en

el proceso de verificación de la clasificación de las imágenes de satélite. Se estudia la evolución temporal de los patrones de fragmentación del bosque nativo en su conjunto utilizando para ello una selección de métricas de paisaje. Ambos procesos se discuten en un marco ecológico, socio-económico y político.

En el **capítulo 6** se predice la variación espacial de la diversidad  $\alpha$  y  $\beta$  en todo el área de estudio a partir de los datos de diversidad y composición de especies arbóreas obtenidos por medio de inventarios de campo. Uno de los principales objetivos de este estudio es el de proponer un método que combine estos dos criterios para la selección de áreas potenciales para la conservación.

En el **capítulo 7** se estudia la influencia de la fragmentación regional y la perturbación local sobre la diversidad de árboles. Estos efectos se examinan, por un lado, a nivel de fragmento, tomando la diversidad promedio del fragmento y relacionándola con descriptores de la fragmentación tales como el área, el área núcleo, la cantidad de borde del fragmento o la conectividad. Este modelo tiene su origen en la teoría de biogeografía de islas. Por otro lado, analizamos la relación entre la diversidad de cada uno de los inventarios forestales con variables relacionadas con la fragmentación y la perturbación local utilizando modelos lineales mixtos. Estos modelos, que se llevaron a cabo para los distintos tipos de vegetación, permiten distinguir efectos 'entre fragmentos' de los efectos 'dentro de cada fragmento'. También se investigan curvas de acumulación especies-individuos para ver cuál sería la pérdida potencial de especies en el caso hipotético de que se redujera a la mitad el número de individuos por fragmento. Todo ello se discute en un marco teórico y práctico con aplicaciones directas a la conservación de estos bosques.

## Referencias

- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.-J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. & Malingreaus, J.-P. 2002. Determinations of deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297: 999-1002.
- Aide, T.M. & Grau, H.R. 2004. Globalization, migration, and Latin American ecosystems. *Science* 305: 1915-1916.
- Arnold, J.E. & Ruiz Pérez, M. 2001. Can non-timber forest products match tropical forest conservation and development objectives? *Ecological Economics* 39(3): 437-447.
- Cayuela, L., González, M., Rey, J.M., Ramírez, N. y Martínez, M. 2005. Imágenes de satélite revelan cómo desaparece el bosque en Chiapas. *Quercus* 232: 60-61.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel Ciencia, Barcelona.
- Costanza, R., Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Debinski, D.M. & Holt, R.D. 2000. A survey and overview of habitat fragmentation experiments. *Conservation Biology* 14(2): 342-355.
- Ecoespaña. 2006. Guía de los Recursos Mundiales. La Riqueza del Pobre. Instituto de Recursos Mundiales, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Banco Mundial. Ecoespaña, Madrid. URL: [www.buenosdiasplaneta.org](http://www.buenosdiasplaneta.org).
- FAO. 2005. Global Forest Resources Assessment 2005. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia. URL: <http://www.fao.org/forestry/fra2005>.
- González-Espinosa, M. 2005. Forest use and conservation implications of the Zapatista rebellion in Chiapas, Mexico. In: Kaimowitz, D. (ed.). *Forests and Conflicts*. ETFRN News No. 43-44 (European Tropical Forest Research Network), Wageningen, The Netherlands. pp 74-76.

- González-Espinosa, M., Rey-Benayas, J.M., Ramírez-Marcial, N., Huston, M.A. & Golicher, D. 2004. Tree diversity in the northern Neotropics: regional patterns in highly diverse Chiapas, Mexico. *Ecography* 27: 741-756.
- Haila, Y. 2002. A conceptual genealogy of fragmentation research: from island biogeography to landscape ecology. *Ecological Applications* 12(2): 321-334.
- Henle, K., Davies, K.F., Kleyer, M., Margule, C. & Settele, J. 2004. Predictors of species sensitivity to fragmentation. *Biodiversity and Conservation* 13: 207-251.
- Houghton, R.A. 1994. The worldwide extend of land-use change. *BioScience* 44: 305-313.
- Koop, G. & Tole, L. 2001. Deforestation, distribution and development. *Global Environmental Change* 11: 193-202.
- Lamb, D., Erskine, P.D. & Parrotta, J.A. 2005. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* 310: 1628-1632.
- Laurance, W.F. 1999. Reflections on the tropical deforestation crisis. *Biological Conservation* 91: 109-117.
- Mace, G., Balmford, A. & Ginsberg, J.R. 1998. *Conservation in a changing world*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Malhi, Y. & Phillips, O.L. 2004. Tropical forests and global atmospheric change: a synthesis. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B* 359: 549-555.
- Meyer, W.B. & Turner, B.L. II. 1994. *Changes in land use and land cover: a global perspective*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Riitters, K., Wickham, J., O'Neill, R., Jones, B. & Smith, E. 2000. Global-scale patterns of forest fragmentation. *Conservation Ecology* 4(2): 3.
- Saunders, D.A., Hobbs, R.J. & Margules, C.R. 1991. Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conservation Biology* 5: 18-32.
- Skole, D. & Tucker, C. 1993. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science* 260: 1905-1909.
- Wolf, J.H.D. & Flamenco, A. 2003. Patterns in species richness and distribution of vascular epiphytes in Chiapas, Mexico. *Journal of Biogeography* 30: 1689-1707.