

LLETRES DE BATALLA

L'ecologia del paisatge: un nou marc de treball per a la ciència de la conservació

Joan Pino & Ferran Rodà*

Rebut: 17.03.99

Acceptat: 02.06.99

Resum

El progressiu coneixement del funcionament dels sistemes naturals ha posat en evidència la necessitat de gestionar l'espai i els recursos de forma global per tal de mantenir els processos que s'estableixen dins i entre els ecosistemes. Per a dur a terme aquesta tasca cal, però, un nou marc de treball que permeti la comprensió i l'anàlisi, a una escala espacial rellevant, d'aquests processos ecològics. En aquest treball s'analitzen les possibilitats d'utilitzar el paisatge com a marc de treball de la ciència de la conservació. Des d'una concepció funcional del paisatge, s'analitzen les implicacions a diverses escales del model tessel·la-corredor-matriu desenvolupat per l'ecologia del paisatge. Finalment, es fa un recull de principis sorgits d'aquest marc de treball que poden ser d'utilitat a l'hora de gestionar i protegir els valors naturals.

PARAULES CLAU: ecologia del paisatge, xarxes ecològiques, tessel·la-corredor-matriu, ciència de la conservació.

Abstract

Landscape ecology, a new framework for conservation science

Increased knowledge of ecosystem function makes clear the need to manage space and resources comprehensively, in order to preserve ecological processes within and between ecosystems. There is a need to develop a conceptual framework that allows the evaluation of these processes at a relevant scale. In this paper, the potential for using the landscape as a framework for conservation science is analyzed. The implications of the patch-corridor-matrix model developed in landscape ecology are evaluated at different spatial scales, emphasizing their functional consequences. The results are summarized in a set of guidelines that may be useful for nature management and conservation.

KEYWORDS: landscape ecology, ecological networks, patch-corridor-matrix, conservation science.

* Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM, Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra. E-mail: joan.pino@cc.uab.es

Resumen

La ecología del paisaje, un nuevo marco de trabajo para la ciencia de la conservación

El progresivo conocimiento del funcionamiento de los sistemas naturales ha puesto en evidencia la necesidad de gestionar el espacio y los recursos de forma global, para mantener los procesos que se establecen dentro y entre los ecosistemas. Para llevar a cabo esta tarea hace falta un nuevo marco de trabajo que permita la comprensión y el análisis, a una escala espacial relevante, de estos procesos ecológicos. En este trabajo se analizan las posibilidades de utilizar el paisaje como marco de trabajo de la ciencia de la conservación. Desde una concepción funcional del paisaje se analizan las implicaciones a diversas escalas del modelo tesela-corredor-matriz desarrollado por la ecología del paisaje. Finalmente, se recogen una serie de principios surgidos de este marco de trabajo que pueden ser de utilidad para gestionar y proteger los valores naturales.

PALABRAS CLAVE: ecología del paisaje, redes ecológicas, tesela-corredor-matriz, ciencia de la conservación.

Introducció: concepcions de paisatge

A causa del seu antic origen, el terme paisatge es presta a diverses interpretacions. Zonneveld (1995) presenta una visió holística del paisatge i el defineix com un sistema complex d'interrelacions que formen conjuntament una part reconeixible de la superfície terrestre i que són originades i mantingudes per l'acció mútua de factors biòtics i abiòtics, i també per l'activitat humana. El paisatge admet, no obstant, això, definicions més parcials (Fig. 1).

El paisatge com a realitat percebuda

Correspon a la percepció més externa del paisatge, la que tenim quan ens hi passegem o

el contemplem des d'un punt d'observació. Incorpora conceptes com la bellesa, l'harmonia, la visibilitat o la qualitat del paisatge que s'han utilitzat en disciplines tan dispars com ara l'arquitectura del paisatge i la biologia de la conservació. S'utilitzen, per exemple, per a analitzar l'ús recreatiu que es fa de les àrees naturals (Múgica, 1994).

El paisatge com a mosaic d'unitats

Aquesta concepció, de caire estructural, ha estat molt utilitzada per ciències amb un fort component descriptiu, com ara la geomorfologia, l'edafologia i la geobotànica. Posa especial èmfasi en que el paisatge és un mosaic d'unitats que tenen una distribució espacial determinada.

El paisatge com a ecosistema

El paisatge és concebut com una entitat funcional, un ecosistema d'escala quilomètrica. Es considera per tant que un determinat paisatge no només és format per un conjunt d'unitats distribuïdes en l'espai, sinó que aquestes unitats estan relacionades per una sèrie de fluxos (materials, energia, organismes, etc.) horitzontals entre unitats i verticals dins d'aquestes unitats. A una escala més gran, altres fluxos connecten un paisatge amb altres paisatges veïns o llunyans. Propietats físiques com ara la mida, la forma i la distribució espacial de les diverses unitats són el resultat dels processos funcionals que tenen lloc a escala de paisatge i, al mateix temps, condicionen aquests processos. Aquesta concepció de paisatge ha estat força emprada per la biologia de la conservació.

Tractaments més o menys globals del paisatge s'han abordat des de diferents àmbits del coneixement, i especialment des de la geografia (Nogué, 1984; Bolòs, 1992). Si ens restringim a la ciència de la conservació, la disciplina que ha desenvolupat el marc conceptual per a entendre els processos que tenen

lloc a aquesta escala és l'anomenada ecologia del paisatge (Fig. 2), que considera el paisatge com una unitat funcional repetible al llarg d'un determinat territori i integrada per un conjunt d'ecosistemes interrelacionats (González-Bernáldez, 1981; Forman & Godron, 1986; Forman, 1997). L'ecologia del paisatge s'ha centrat en l'estudi de tres grans aspectes definidors d'un territori: l'estructura (patrons de distribució espacial dels diversos components), la funció (els fluxos entre els components del paisatge) i la dinàmica (alteracions de l'estructura i la funció al llarg del temps).

Paisatge, natura i cultura

Quan es considera el paisatge des del punt de vista funcional que proposa l'ecologia del paisatge, cal no menystenir l'ésser humà com a agent modelador del territori. En el cas de territoris fortament antropitzats es pot afirmar que el paisatge és el resultat de la interacció entre natura i cultura (Zonneveld, 1995; Farina, 1998). Diverses escoles geogràfiques (vegeu Nogué, 1984) han treballat sobre la base d'aquesta interacció i constaten l'estreta relació entre l'estructura del paisatge i la manera de viure dels seus habitants. Per aquest motiu, la gestió (i la conservació si s'escau) de determinats paisatges s'ha de fer prenent en consideració les pautes d'utilització humana dels recursos.

Unitats del paisatge

La utilització del paisatge com a marc de treball es recolza en un conjunt d'unitats que, de forma genèrica, han estat anomenades elements del paisatge (*landscape elements*, Forman & Godron, 1986). La unitat espacial mínima dins un determinat paisatge ha estat



FIGURA 1. Tres concepcions complementàries del paisatge. La percebuda (a dalt) incorpora els aspectes més estètics i visuals del paisatge. L'estructural (al mig) considera el paisatge format per diversos elements (en aquest cas diverses classes de cobertes del sòl). La funcional (a baix) té en compte no només l'existència d'aquests elements, sinó també les relacions i els fluxos entre ells (representats per fletxes).

Three complementary concepts of landscape. The perceptual one (above) considers aesthetic and visual attributes of landscape. The structural one (middle) assumes that landscapes are made up by diverse elements (in this case land cover classes). The functional one (below) not only considers the existence of these elements, but also relationships and fluxes between them (represented by arrows).

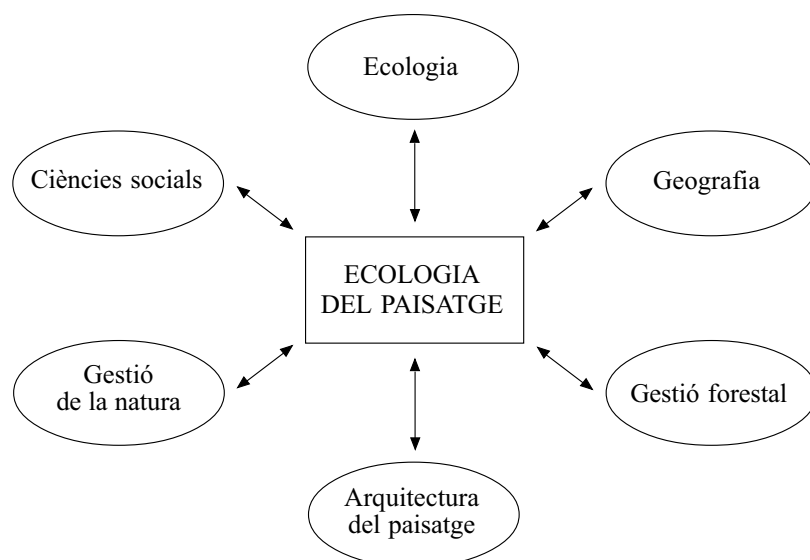


FIGURA 2. Representació de l'ecologia del paisatge com la intersecció de diverses disciplines teòriques i aplicades de la biologia, la geografia i les ciències socials (Crow, 1991).

Landscape ecology represented as the intersection of both theoretic and applied disciplines of biology, geography and social sciences (Crow, 1991).

anomenada unitat de paisatge (*landscape unit*), ecòtop, biòtop, hàbitat i lloc (*site*). Per a un ecòleg del paisatge, i pensant en termes de representació cartogràfica, l'ecòtop és la unitat mínima cartografiada, definida espacialment i relativament uniforme pel que fa als processos que tenen lloc al seu interior (Bielsa, 1996), però que sovint no passa de ser un concepte teòric difícilment traslladable a la realitat. Els diversos ecòtops formen un determinat paisatge, i paisatges diferents s'integren en una unitat jeràrquicament superior, la regió (Forman & Godron, 1986). La unió de totes les regions possibles ens portaria a la unitat d'ordre superior, l'ecosfera. D'altra banda, Forman & Godron (1986) proposen un model de descripció del paisatge en el qual es consideren tres elements que corresponen a categories d'ecòtops: les tesselles (*patches*), els corredors (*corridors*) i la matriu subjacent (*matrix*).

Les tesselles (*patches*)

En l'àmbit de coneixement de l'ecologia del paisatge es defineix una tessella o taca com una superfície amb característiques relativament homogènies i diferents de les del seu voltant. Les tesselles poden variar àmpliament en mida, forma, heterogeneïtat, tipus de vora, etc. i, tal com es comentarà més endavant, tots aquests paràmetres poden ser de gran importància en el funcionament ecològic del paisatge.

Els corredors (*corridors*)

Els corredors són definits com a elements (tesselles) lineals del paisatge. Segons Forman (1997) els corredors poden esdevenir hàbitats per a moltes espècies poc exigents ecològicament (espècies de marge o generalistes), conductes que canalitzen els fluxos de recursos i d'organismes, barreres o filtres quan es disposen perpendicularment a la direcció d'aquests fluxos, font d'organismes

que es poden propagar a les tesselles properes o a la matriu circumdant, o fins i tot embornals (*sinks*) on es concentren els organismes provinents de la matriu o de les tesselles. Forman & Godron (1986) distingeixen tres tipus bàsics de corredor:

Corredors lineals (*line corridors*). En són exemples els camins, tanques verdes i marges de camps, canals, etc.

Bandes (*strip corridors*). Són corredors més amples, amb un gradient de condicions ambientals des del centre del corredor cap als seus marges.

Corredors fluvials (*stream corridors*). Són un tipus especial de corredors d'amplada variable, localitzats als cursos d'aigua i a les seves vores. S'estructuren en xarxes complexes a través de les quals s'estableix un flux important d'aigua, sediments, nutrients i organismes.

Es pot considerar, encara, un altre element del paisatge que fa funcions de corredor (Forman, 1997): són les passeres (*stepping stones*), que es poden definir com corredors discontinus, formats per tesselles de paisatge similars entre si i prou properes per a mantenir fluxos a través de tot el conjunt.

La matriu subjacent (*matrix*)

En general, es considera que la matriu és el tipus de tessella que ocupa major superfície en el paisatge, com seria el cas de la matriu agrícola en un paisatge del Penedès o de la Conca de Barberà. No obstant això, quan la fragmentació del paisatge és molt elevada sovint és difícil establir quin és el tipus de tessella predominant. En aquest cas s'opta per considerar com a matriu l'element amb un grau d'interconnexió més elevat. Per aquest motiu es consideren com a matriu les xarxes de tanques arbrades que envolten els conreus i que reticulen els paisatges humanitzats de muntanya mitjana. Si aquest criteri és encara insuficient es tria com a matriu aquell ele-

ment que té més influència en la dinàmica del paisatge. Seria el cas dels petits claps de vegetació natural que serveixen de font de llavors per a la recolonització d'un territori agrícola recentment abandonat.

Atributs dels elements del paisatge

S'han definit diversos atributs de les tesselles, els corredors i la matriu que es poden relacionar amb la capacitat d'aquests elements del paisatge per a albergar processos ecològics diversos (Forman & Godron, 1986; Forman, 1995; 1997).

Les tesselles

Els principals atributs topològics de les tesselles són llur mida, la forma, i nombre i disposició a l'espai.

Mida

La superfície de les tesselles és un atribut estretament relacionat amb les funcions ecològiques que poden dur a terme. El nombre d'espècies d'un determinat hàbitat és sovint funció creixent de la seva superfície. Això és el que recull la teoria de la biogeografia insular (Mac Arthur & Wilson, 1967), segons la qual el nombre d'espècies d'un hàbitat aïllat augmenta en relació directa amb la mida de l'hàbitat i en relació inversa amb la distància a d'altres hàbitats similars. Això és aplicable tant quan l'aïllament és per causes naturals (illes, llacs, estatges culminals de muntanyes, etc.) com quan és degut a l'activitat humana (tesselles residuals de bosc en àrees agrícoles, etc.). Una de les explicacions de la disminució de la diversitat amb la mida de la tessella es relaciona amb el concepte de població mínima viable (Meffé & Carroll, 1994). La disminució de l'hàbitat sovint determina que les poblacions de molts organismes disminu-

eixin per sota de la seva mida mínima viable i, consegüentment, desapareguin. Atès que no tots els organismes tenen els mateixos requeriments d'hàbitat, el nombre d'efectius que pot suportar una tessel·la és diferent segons l'espècie i, per tant, la reducció de l'hàbitat afectarà cada tàxon de forma diferent. En general s'observa que les espècies de mida més gran i que ocupen els nivells superiors de la cadena tròfica, com ara els grans carnívors, són les que es troben a una densitat menor i, per tant, tenen uns requeriments d'hàbitat més grans. Aquestes espècies són, per aquest motiu, especialment vulnerables a la fragmentació de l'hàbitat.

Forma

L'efecte principal de la forma sobre els processos ecològics que tenen lloc a les tessel·les és relacionat amb l'efecte marge. Existeix un gradient de condicions ambientals des de la vora fins a l'interior de la tessel·la (Forman & Godron, 1986). En el marge entre dos hàbitats diferents, també anomenat ecotó, sovint hi trobem una elevada diversitat biològica, ja que hi conflueixen espècies poc exigents dels hàbitats adjacents i d'altres que exploten diversos hàbitats per a les funcions biològiques diferents (cacera, reproducció, etc.). L'interior de les tessel·les, en canvi, és una zona de refugi on hi ha pocs intercanvis amb tessel·les adjacents i, per això, és l'hàbitat de les espècies més exigents. Atès que hi ha una banda perimetral on es manifesta l'efecte marge, l'establiment d'unes condicions típiques d'interior dependrà de la mida de la tessel·la, però també de la importància relativa de la zona interior i del marge. Colville (1995) mesura la relació entre aquests dos paràmetres mitjançant el quocient entre perímetre i àrea. Forman (1997) proposa utilitzar diverses mesures que conjuntament donen una idea més completa de la forma: l'elongació, la convolució, l'àrea interior i el perímetre.

L'elongació és el quocient entre longitud i l'amplada del menor rectangle circumscrit a la tessel·la. Com més elongada és una tessel·la més important és l'efecte marge. La convolució correspon al nombre de lòbuls en relació a la mida de la tessel·la. De nou, com més convoluta és una tessel·la més important és l'efecte marge i per això hi predominen les espècies pròpies d'ecotó. La creació de lòbuls també afecta a causa de les espècies d'interior de tessel·la degut a l'anomenat *efecte península* (Forman, 1997): al centre dels lòbuls més grans les condicions ambientals poden permetre la supervivència de poblacions d'espècies d'interior, però, sovint, aquestes poblacions resten aïllades de les del centre de la tessel·la perquè a l'istme les condicions són de marge. Això determina la fragmentació de les poblacions, amb els problemes d'aïllament genètic entre subpoblacions que això comporta. L'interior de la tessel·la correspon a l'àrea del màxim cercle inscrit, que dona una idea de la zona on es poden establir condicions d'interior. Finalment, la longitud del perímetre permet avaluar la importància de la zona d'ecotó, on l'hàbitat es relaciona més intensament amb d'altres i on predominen les espècies de marge.

Nombre i disposició

Els efectes negatius d'una mida petita (i d'una forma poc adequada) sobre el funcionament ecològic de les tessel·les es poden veure compensats si hi ha a prop un nombre prou elevat de tessel·les similars. Això ens porta al debat SLOSS (*Single Large or Several Small*), una de les controvèrsies més importants en biologia de la conservació: És millor que un hàbitat estigui concentrat en una gran tessel·la o bé que es trobi repartit en molts polígons petits? Aquesta discussió apareix quan s'estudia el funcionament ecològic de les tessel·les, la seva biodiversitat o riquesa d'espècies, i fins i tot la viabilitat de les poblacions d'una deter-

minada espècie, però també quan s'aborda la protecció d'una determinada àrea (Meffé & Carroll, 1994). En general no hi ha una única resposta per a aquesta discussió, ja que la mida, el nombre i la disposició de les tesselles d'un determinat hàbitat afecten les diverses espècies i processos ecològics de forma diferent. Per algunes espècies pot ser tolerable, o beneficiós, que l'hàbitat que ocupen estigui disseminat en una àrea relativament gran, però, en general, com més estenoic és un organisme més dificultats té per a sobreviure en un medi fragmentat.

La discussió sobre el nombre i disposició òptims de les tesselles d'un hàbitat determinat es recolza principalment en la teoria de les metapoblacions. En hàbitats fragmentats, les poblacions de molts organismes es troben dividides en subpoblacions, la relació entre les quals depèn de la distància en què es troben i dels hàbitats que les separen, però també de la capacitat de dispersió dels individus i de les seves diàspores i gamets. Aquestes subpoblacions constitueixen, en conjunt, una metapoblació que sovint es troba sotmesa a una dinàmica d'extincions i recolonitzacions locals en funció de les característiques de l'espècie i de l'abundància i disposició espacial dels hàbitats ocupables (Wiens, 1997). En general, la viabilitat d'una metapoblació és més probable com més nombroses són les tesselles ocupables i menor és la distància entre elles. Sovint, però, s'estableixen dinàmiques més complicades perquè el territori ocupat pot ser dividit en àrees favorables (*source areas*), on les poblacions augmenten i d'on hi ha una emigració d'individus, i àrees desfavorables (*sink areas*), on les poblacions es mantenen gràcies a la immigració (vegeu, a títol d'exemple, Gaona *et al.*, 1998). En aquests cas pot ser interessant afavorir la connexió entre hàbitats favorables i, en canvi, impedir l'accés a les àrees desfavorables on hi ha una pèrdua continuada d'efectius.

Els corredors

Com ja s'ha comentat, els corredors són un tipus especial de tesselles i les consideracions anteriors sobre els atributs de mida, forma, nombre i disposició també es poden aplicar aquí. Seguidament es consideren altres atributs específics dels corredors.

Amplada

Com més ample és un corredor, les condicions del seu centre són més semblants a les de l'interior d'una tessella. Així, els corredors més estrets funcionen més com a passadissos, mentre que els més amples esdevenen hàbitats adequats per a moltes espècies, fins i tot algunes d'interior de taca.

Forma: curvilinearitat

A part dels atributs de forma propis de les tesselles considerem aquí la curvilinearitat o sinuositat del corredor. La sinuositat del traçat del corredor afecta el moviment de les espècies i els fluxos que tenen lloc al seu interior. Com més recte és el corredor més eficient és el moviment de les espècies i el transport de materials i energia. A més, la relació amb l'exterior del corredor és menys important atès que la relació perímetre/àrea és més baixa.

Presència d'interrupcions, estretalls, nodes

La funció de passadís es pot veure afectada per la presència d'interrupcions o discontinuïtats, estretalls (com ara passos estrets en un riu) i nodes (com ara aiguabarrejors o planes d'inundació). L'excés d'interrupcions pot convertir el corredor en un conjunt de passeres (*stepping stones*) que, tanmateix, esdevenen més permeables en sentit perpendicular, ja que les interrupcions connecten els hàbitats a banda i banda del corredor. Els estretalls tenen en general efectes menys pronunciats que les passeres sobre els fluxos de materials i organismes al llarg i a través dels corredors.

Finalment, els nodes o eixamplaments del corredor permeten el manteniment de micro-hàbitats dins el corredor, on poden viure nombrosos organismes.

La matriu

Com ja s'ha esmentat, la matriu és un tipus especial de tessella que queda definida pel criteri de major superfície ocupada o, en el seu defecte, pels de major grau d'interconnexió o de control sobre el funcionament ecològic del paisatge. Ateses les seves diferències amb les tesselles típiques i els corredors, la matriu compta amb alguns atributs característics.

Porositat

El grau de porositat de la matriu fa referència a la densitat de tesselles d'altres tipus d'hàbitats dins la matriu, sense considerar la seva mida. En general és un indicador del grau d'efecte marge present en una matriu, òbviament relacionat amb l'adequació de l'hàbitat per a espècies de marge (elevada porositat) o d'interior de tessella (baixa porositat).

Connectància

Aquest atribut, recolzat en el terme matemàtic del mateix nom (Forman & Godron, 1986) fa referència a la continuïtat existent en un determinat hàbitat. Quan la connectància és total existeix una única tessella. En casos d'elevada porositat, una matriu molt interconnectada es pot assimilar a una xarxa de corredors, com seria el cas abans exposat de les tanques verdes en un paisatge agrícola de muntanya.

Atributs referents al paisatge en conjunt

De la concepció funcional del paisatge es deriva que aquest tingui, com tot sistema, una sèrie de característiques o atributs que sovint

no provenen directament dels atributs dels seus elements sinó de la interacció entre ells (Forman & Godron, 1986; Turner, 1989; Colville, 1995; Aronson & Le Floch, 1996; Bielsa, 1996). Bona part d'aquests atributs descriuen propietats estructurals del paisatge, per bé que també porten de forma implícita altres característiques funcionals, i sovint la classificació del paisatge utilitzant aquests atributs depèn de les unitats (usos del sòl, tipus de vegetació, elements geomorfològics, etc.) que es consideren. Seguidament s'enumeren els més utilitzats.

Àrea total

Correspon a la superfície total del paisatge estudiat.

Nombre de classes

Mesura el nombre de classes de tesselles o hàbitats diferents que es troben en un determinat paisatge.

Nombre de tesselles

Correspon al nombre total de polígons del paisatge.

Diversitat

Mesura la diversitat de les categories considerades en un determinat paisatge, normalment mitjançant l'índex de Shannon-Weaver

$$H = -\sum p_i \cdot \log(p_i)$$

on p_i correspon a la proporció (en superfície) d'un determinat hàbitat o classe al paisatge estudiat.

Dominància

Mesura el predomini d'unes classes o hàbitats sobre els altres

$$D = [H_{max} + \sum p_i \cdot \log(p_i)] / H_{max}$$

Es tracta senzillament d'una normalització de l'índex de diversitat per la diversitat màxima H_{max} , que correspon al log del nombre de classes. Els valors oscil·len entre 0, que indica que tots els hàbitats són equiprobables, i 1, que significa que només hi ha un hàbitat que recobreix el 100 % del territori.

Contagi

És utilitzat com a mesura d'adjacència entre hàbitats d'un paisatge. Per a cada hàbitat o classe es calcula la seva dispersió en el paisatge i els valors es combinen en un únic índex que pren valors entre 0 i 1

$$C = [K_{max} + \sum \sum q_{ij} \cdot \log(q_{ij})] / K_{max}$$

on q_{ij} és la proporció de l'hàbitat i adjacent a l'hàbitat, j i K_{max} és $2m \cdot \ln(m)$, essent m el nombre total de classes o hàbitats.

Fragmentació

Correspon senzillament al nombre total de polígons dividit pel nombre d'hàbitats o classes.

Mida de gra (*grain size*)

Es calcula a partir de la mitjana de l'àrea dels elements del paisatge, que pot condicionar, per exemple, la supervivència d'espècies segons els seus requeriments ecològics. Els paisatges de gra gruixut sovint mantenen poblacions viables d'organismes d'interior de les tesselles, mentre que els de gra fi són dominats per espècies de marge.

Connectància i connectivitat

Alguns atributs del paisatge mostren al mateix temps connotacions estructurals i funcionals que sovint han generat una certa confusió. Aquest és el cas de la connectivitat en sentit genèric, que per a molts autors és un únic atribut i per a d'altres pot ser dividida en

dos: la connectància i la connectivitat. La connectància fa referència a la connexió des del punt de vista estructural, és a dir, la presència de connexions físiques entre els elements del paisatge que es consideren. S'avalua a partir de mesures de distància, o d'adjacència, entre les diverses tesselles de l'hàbitat considerat. També es pot mesurar per als diversos hàbitats (Colville, 1995), construint la matriu de connectància a partir de la longitud de marge compartit per cada parella d'hàbitats. D'altra banda, la connectivitat fa referència als aspectes funcionals de la connexió entre els elements del paisatge, com és ara els patrons de moviment i migració d'organismes, la seva resposta a la presència de barreres al paisatge, etc. És una mesura que necessita, per tant, de la recerca bàsica i que es recolza en la connexió estructural. El concepte de connectivitat és essencial en ecologia del paisatge perquè complementa la concepció purament física que ens proporciona la connectància: No només cal assegurar la connexió física entre tesselles, sinó que cal que els processos es propaguin entre elles. En general, una elevada connectància és una condició necessària per a una elevada connectivitat, encara que no sempre: la presència de passeres (*stepping stones*) pot assegurar la connectivitat entre dos elements del paisatge encara que no hi hagi connectància. Organismes com ara els ocells tampoc necessiten el manteniment d'una connectància física entre els elements del paisatge, i toleren la presència de barreres físiques importants.

Forman (1995) proposa un altre concepte complementari de la connectivitat: la impedància o resistència del paisatge (*landscape resistance*). Aquest atribut, oposat a la permeabilitat, fa referència a les dificultats que posen els diversos elements del paisatge a l'establiment de fluxos de matèria, energia, organismes i gens, degudes a l'existència de barreres estructurals. Com s'ha comentat en l'apartat

anterior, que un element del paisatge es comporti com un passadís (que canalitza fluxos) o com una barrera depèn en part de la seva orientació en relació amb la direcció dels fluxos.

Aplicació a models concrets de paisatge: El model agregat amb enclavaments (*aggregate-with-outliers*)

Un cop es compta amb la capacitat de descriure i quantificar el paisatge sorgeix la pregunta de quina o quines configuracions espacials dels diversos elements descrits poden optimitzar el manteniment dels organismes i els processos ecològics d'un territori. La resposta ha estat sovint abordada de forma empírica, analitzant els paisatges amb major diversitat biològica i amb gran nombre d'interaccions entre llurs unitats, i també mitjançant l'establiment de models de simulació. Forman (1995; 1997) proposa una aproximació bàsicament conceptual, però tanmateix útil en la planificació del territori. Segons l'autor, la millor distribució espacial és aquella que agrega els diferents usos en grans tessel·les, però dins d'aquestes permet el manteniment d'enclavaments (*outliers*) d'altres usos. Són exemples d'enclavaments les masies i les petites explotacions agrícoles que resten emmig del bosc o els retalls de vegetació natural que esquitxen moltes planes agrícoles.

El model resultant, anomenat *agregat amb enclavaments*, integra una sèrie d'avantatges per a la conservació de processos a escala de paisatge que són més evidents en indrets amb un cert equilibri entre usos del sòl urbans, agrícoles i naturals. El manteniment simultani de grans àrees ajustades a característiques topogràfiques i ecològiques del territori (com ara conques hidrogràfiques senceres) i de petits enclavaments permet compaginar la conservació de processos d'abast territorial força divers. En el cas dels hàbitats naturals, els

agregats mantenen les funcions ecosistèmiques bàsiques del territori, algunes de gran abast territorial com és ara diversos processos hidrològics, i els gruixos de les poblacions de molts organismes. Els enclavaments, en canvi, acullen una elevada diversitat d'espècies i sovint són reservoris d'efectius que permeten la recolonització d'àrees properes (per exemple, conreus abandonats o àrees afectades per incendis). Des del punt de vista de la planificació territorial, l'agregació dels usos del sòl també pot ajudar a prevenir el desenvolupament urbanístic anàrquic i a mantenir la identitat dels municipis, en contra del que comporta un model de desenvolupament difús.

El model agregat amb enclavaments és, tanmateix, criticable pel seu caràcter fonamentalment conceptual que suposa una certa indefinició en els seus postulats. No aporta gaire informació sobre quina proporció d'un determinat ús del sòl ha d'estar en forma d'agregats o d'enclavaments, ni tampoc sobre les dimensions (absolutes o relatives) que han de tenir les diverses tessel·les. D'altra banda, el problema de quina escala territorial cal triar, tanmateix comú a molts àmbits de l'ecologia del paisatge, esdevé en aquest cas especialment punyent: bona part dels paisatges humanitzats poden ser assimilats al model senzillament variant l'escala de treball, que pot anar des d'uns quants quilòmetres (una vall determinada) a unes desenes o centenars (una comarca o un conjunt de comarques).

Aplicació a escala regional: les xarxes ecològiques

S'introdueix ara un concepte que cada cop pren més importància en el disseny de polítiques de protecció de la natura i que està rela-

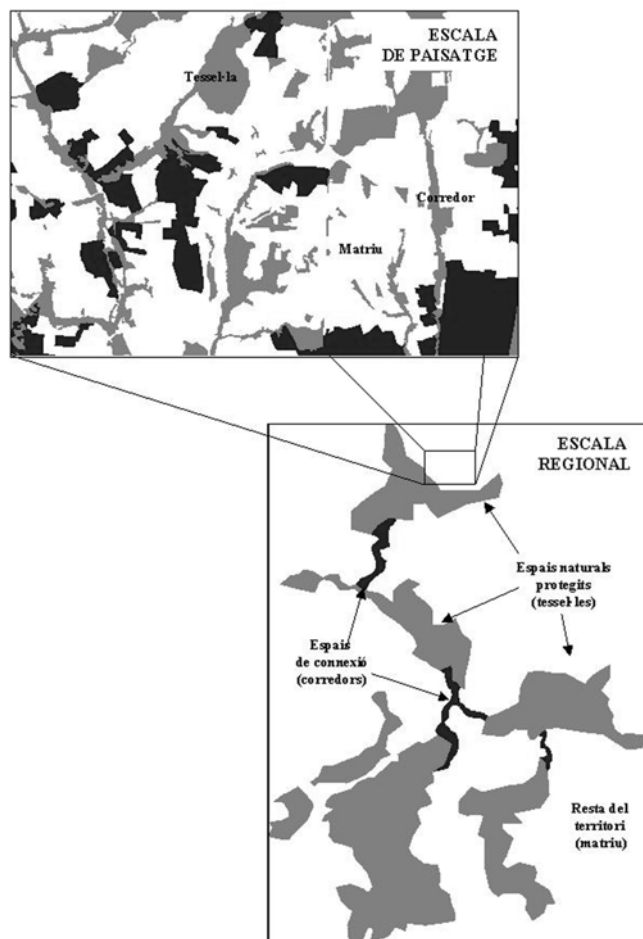


FIGURA 3. El model tessell·la-corredor-matriu representat a escala de paisatge (a dalt), on els elements són diverses classes de cobertes del sòl, i a escala regional (a baix), on els elements del model s'assimilen a àrees amb funcions diferents pel que fa a la conservació dels valors naturals.

Patch-corridor-matrix model represented at the landscape scale (above), where elements correspond to land cover classes, and at the regional scale (below), where elements correspond to areas with different functions in nature conservation.

cionat amb el model tessell·la-corredor-matriu (Fig. 3). Les xarxes ecològiques són el resultat de l'aplicació a escala regional, i en un context de planificació territorial, de les bases d'aquest model. Els espais naturals protegits s'assimilen a tessell·les, les àrees de connexió intermèdies als corredors i la resta del territori, que pot presentar un grau d'humanització

variable, a la matriu (Forman & Godron, 1986). Les reflexions dutes a terme sobre els atributs de mida, forma i disposició dels elements del paisatge també es poden aplicar, amb certes reserves, sobre els elements que integren aquestes xarxes.

El disseny i la implementació de xarxes ecològiques és un fenomen que es consolida a

la dècada dels noranta com a resposta a la progressiva artificialització del territori. Es recolza en el concepte de corredor biològic, entès com a connexió biològica o paisatgística, que ha estat desenvolupat i portat a la pràctica als Estats Units durant els darrers 25 anys (Mallarach, 1993). Tradicionalment, la protecció de la natura s'havia articulada al voltant de la declaració de reserves destinades a esdevenir illes naturals en un entorn cada cop més antropitzat. No obstant això, aviat s'alçaren veus en contra d'aquesta compartimentació del territori en àrees protegides i no protegides (vegeu a títol d'exemple Terradas, 1976). Durant els darrers anys s'ha fet més evident la necessitat de mantenir la connexió entre els espais naturals per tal de protegir els valors pels quals van ser delimitats. Assistim, llavors, a una certa reconversió dels sistemes d'espais naturals dissenyats en èpoques anteriors a xarxes ecològiques, dins les quals aquests espais queden units per la delimitació d'àrees de connexió. Entre els exemples més interessants cal esmentar la proposta de xarxa ecològica europea (*European Ecological Network, EECONET*) sorgida en el si de l'European Centre for Nature Conservation (ECNC). La xarxa EECONET es desenvolupa de forma independent però coordinada als diversos països implicats, i es basteix sobre les àrees naturals delimitades en altres projectes europeus com ara el Natura 2000 (Bennett & Wolters, 1996). Aquestes àrees (*core areas*) són interconnectades per corredors fluvials, àrees seminaturals (*buffer areas*) o zones on la recuperació dels valors naturals és factible (*nature development areas*). A casa nostra s'han dut a terme alguns estudis que analitzen la idoneïtat i les possibilitats d'implementació de xarxes de corredors (Mallarach, 1993) que s'han concretat en diverses propostes de connexió dels espais naturals més interessants de les comarques de l'Empordà (Fortià, 1995a; 1995b), de l'Ebre

(Bielsa, 1996) i de la plana del Vallès (Diego *et al.*, 1994). Prenent com a base aquests treballs, el Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya ha ultimada recentment una anàlisi de les característiques del territori que permetin definir criteris per a avaluar i mantenir les connexions biològiques entre els espais del PEIN. En aquest context s'emmarca també el projecte d'Anella Verda engegat per la Diputació de Barcelona i que pot esdevenir realitat en un futur proper. Es tracta d'una xarxa ecològica que comprèn els espais naturals protegits de l'àrea metropolitana de Barcelona i el conjunt d'àrees rurals que els interconnecten.

El component temporal

Als apartats previs s'han considerat factors relacionats amb l'estructura espacial del paisatge, que fan referència a la mida, forma i disposició dels seus elements. Cal, però, tenir en compte que els paisatges no només canvien en l'espai sinó també en el temps. L'aparició de perturbacions, naturals o antròpiques, que afecten els diversos ecosistemes de forma puntual en l'espai i el temps sovint determina un paisatge on hi conviuen els estadis successional dels diversos ecosistemes, creant un mosaic força canviant. La conservació d'aquest mosaic espaciotemporal permet, entre altres coses, el manteniment d'una diversitat d'espècies més elevada que la recuperació d'un paisatge format només pels ecosistemes més madurs, ja que en el primer cas també hi poden viure els organismes dels estadis inicials i intermedis de la successió. Aquesta situació és freqüent als paisatges mediterranis, on la continuada interacció amb les activitats humanes determina una coexistència d'ambients naturals, seminaturals i antròpics que permeten el manteniment d'una elevada diversitat biològica i paisatgística.

Aplicacions a la biologia de la conservació

Segons el fins ara exposat, l'ecologia del paisatge pot proporcionar un marc conceptual per a comprendre el funcionament ecològic del territori en relació als atributs i a la configuració espacial dels seus elements. A partir d'aquest marc de treball hom ha intentat extreure'n una sèrie de principis, sovint obvis però tanmateix interessants a considerar en la gestió i el planejament del territori, tant des de l'escala de paisatge com des d'una perspectiva regional que contempli les relacions entre paisatges.

A nivell de paisatge

Mantenir l'heterogeneïtat espacial

Ateses les relacions existents entre diversitat d'ecosistemes i diversitat d'organismes, cal afavorir el manteniment d'un mosaic prou heterogeni d'hàbitats, sense caure, tanmateix, en una excessiva fragmentació del paisatge. En alguns espais naturals, el progressiu abandonament de les activitats tradicionals està comportant una forestalització del paisatge i una pèrdua gradual d'hàbitats oberts. En molts d'aquests espais, el manteniment d'una certa diversitat d'hàbitats passa, per tant, per evitar l'abandonament de les explotacions agrícoles, ramaderes i forestals tradicionals. Això no obstant, cal compaginar-ho amb la conservació i fins i tot la recuperació d'extensions prou significatives dels hàbitats més madurs que, com passa a l'àrea mediterrània, han esdevingut testimonials.

Assumir (i mantenir) la variabilitat temporal dels sistemes ecològics

Com ja s'ha comentat a l'apartat precedent, el règim de pertorbacions que suporten els diversos ecosistemes determina l'aparició d'un patró de variabilitat temporal que, a nivell de paisatge, se suma a la variabilitat espacial

existent. Cal assumir aquesta variabilitat temporal i prendre en consideració els possibles efectes de les diverses pertorbacions (explotació forestal, llaurades, riuades, incendis, etc.) sobre el ecosistema d'un territori. D'altra banda, cal tenir present que la persistència de molts ecosistemes no és possible si no es manté el règim de pertorbacions que els va originar. Aquest és el cas de molts hàbitats seminaturals d'origen antròpic (guarets, pastures, deveses), la conservació dels quals esdevé un problema a causa del progressiu abandonament dels assentaments humans.

Considerar la mida i la distribució dels elements del paisatge

Cal incloure la informació aportada pels atributs dels elements del paisatge en la gestió territorial i, si cal, optimitzar l'estructura d'aquest paisatge partint d'aquesta informació. En general, cal tendir cap a un paisatge agregat amb enclavaments, concentrant els usos del sòl per tal d'aconseguir àrees homogènies extenses, que mantenen funcions ecològiques i organismes típics de l'interior de tessella. També cal evitar, però, una excessiva concentració d'usos del sòl que porti a una reducció de la biodiversitat i a la simplificació excessiva del paisatge, com s'ha esdevingut a moltes àrees agrícoles de resultes de la concentració parcel·lària. Fins i tot a les grans tesselles del paisatge és important mantenir-hi enclavaments, com ara àrees agrícoles enmig de grans extensions de bosc, o hàbitats naturals enmig de zones cultivades. Aquests hàbitats introdueixen ecotons al paisatge i permeten augmentar localment la diversitat d'organismes.

Afavorir la connectància i la connectivitat

La persistència de les poblacions de molts organismes exigeix el manteniment de la continuïtat dels diversos elements del paisatge. Cal potenciar, per exemple, l'existència d'una xarxa d'elements lineals (tanques verdes, corredors

fluvials, etc.) que connecti els fragments de bosc que romanen als paisatges dominats per una matriu agrícola. Aquests elements, a banda de mantenir la permeabilitat del paisatge, constitueixen ecotons on s'incrementa la biodiversitat. Al contrari, cal vigilar la disposició espacial de diversos usos del sòl, en particular de les infraestructures viàries, que poden suposar barreres a fluxos de materials i d'organismes. Sempre que es pugui cal evitar la instal·lació d'aquestes obres de forma perpendicular a la direcció dels fluxos principals i, si això no és possible, cal buscar solucions que minimitzin el problema, com ara instal·lar passos de fauna de mida i disposició adequades. D'altra banda, s'ha de tenir present que la continuïtat física dels hàbitats (connectància) és un factor necessari però no suficient per al bon funcionament ecològic del paisatge, ja que no assegura per si sola el manteniment de les interrelacions entre els hàbitats connectats.

Prioritzar la preservació de processos

El progressiu coneixement del funcionament dels sistemes naturals ha portat a considerar la conservació dels processos per sobre de la de determinades espècies. La preservació del màxim de diversitat biològica entronca amb aquest canvi de pensament, ja que pretén la conservació dels actors que duen a terme aquests processos, dins i entre ecosistemes. Això no obstant, convé compaginar la preservació de la biodiversitat en conjunt amb la protecció de determinades espècies. Algunes d'aquestes espècies, particularment carismàtiques, podrien afavorir un creixent interès del públic per a protegir determinats indrets i, de retruc, això repercutiria en la conservació del conjunt d'ecosistemes del territori.

A nivell regional

La mida i la disposició dels espais protegits

És obvi que la mida i la disposició dels espais protegits (considerats com a tessel·les en un

enfocament regional de conservació) no obeeix a criteris de funcionalisme ecològic, sinó que són el resultat de processos socioeconòmics que han operat al llarg de molts anys. Cal, tanmateix, que ens esforcem perquè aquests espais siguin prou grans per a albergar poblacions mínimes viables dels organismes que volem preservar dins dels seus límits. De manera similar, convé que els espais no es trobin gaire allunyats entre si per tal d'afavorir el manteniment dels processos ecològics que tenen lloc entre ells, com és ara l'intercanvi d'organismes, la participació en xarxes tròfiques, etc.

Mantenir l'heterogeneïtat d'ecosistemes

A l'hora de delimitar els espais protegits s'ha prioritzat la preservació de determinats ecosistemes (rars, vulnerables, o representatius dels ambients naturals del territori) on la intervenció humana ha estat relativament baixa, sense considerar la importància relativa dels diversos ecosistemes en el funcionament ecològic general del territori. Això ha comportat la preservació d'una elevada proporció de determinats ecosistemes, mentre que d'altres només tenen una part molt testimonial de llur territori protegida. Entre els més maltractats des del punt de vista de la conservació cal esmentar els ambients agrícoles tradicionals, importants refugis de biodiversitat i d'espècies clau per a diversos ecosistemes, i actualment amenaçats per la intensificació dels conreus a les zones més productives i l'abandonament de terres a les àrees més marginals. A l'hora de dissenyar una xarxa ecològica convindria incloure, a més d'espais relativament poc alterats per l'activitat humana, d'altres amb una proporció notable d'ambients seminaturals com ara els boscos mediterranis sotmesos a explotació, els conreus i les pastures. Això permetria potenciar els lligams ecològics entre les zones naturals, que sovint actuen d'àrees de refugi o de nidificació, i

les agrícoles, que són utilitzades com a territoris de cacera o com a àrees de dispersió dels individus immaturs.

Assumir la variabilitat temporal dels sistemes naturals

Atès que els ecosistemes poden patir canvis deguts a pertorbacions puntuals, el disseny i la gestió de xarxes ecològiques ha de preveure els possibles efectes sobre el manteniment dels organismes i els processos. Cal dissenyar, per exemple, les oportunes connexions entre els espais naturals de la xarxa per tal d'afavorir la recolonització dels hàbitats afectats per pertorbacions com ara els incendis forestals. En el cas de xarxes ecològiques dissenyades a escala internacional també convé preveure la possible migració latitudinal dels diversos tipus d'ecosistemes com a conseqüència de l'escalfament global previst.

Afavorir la connectivitat

La connexió física i funcional dels espais protegits permet mantenir processos que tenen lloc a nivell regional, com ara la dispersió dels exemplars juvenils en busca de nous territoris o fins i tot les migracions estacionals d'ocells. Cal, però, pensar en les àrees de connexió no només com a passadissos per on es canalitzen fluxos, sinó també com a territoris dotats de sistemes naturals que interaccionen entre si i amb els dels espais protegits del seu voltant. Per això aquests connectors han d'ésser territoris grans (idealment tan grans, o gairebé, com els espais protegits) i amb una certa diversitat d'hàbitats que els permeti allotjar gran nombre d'organismes i processos, sense perjudicar tanmateix la seva funció connectora.

Epíleg

La protecció dels sistemes naturals ha passat per un seguit d'etapes en les quals s'han anat

considerant successivament el paper dels diversos elements del paisatge. La delimitació de les àrees més emblemàtiques o vulnerables que va portar a la definició d'un sistema d'espais naturals aïllats representa un primer estadi en què només es tenia consciència de la utilitat de les tesselles per a protegir unes determinades espècies o ecosistemes. Posteriorment es començà a intuir que cal una interconnexió entre tesselles per tal de mantenir aquests valors naturals en un medi cada cop més artificialitzat, i això va representar prendre consciència que calien uns elements connectors en la xarxa d'espais protegits. N'hi ha prou amb aquests elements per a assegurar el manteniment del funcionament ecològic del territori, del qual depenen moltes, si no totes, les activitats que hi duem a terme? És evident que falta considerar el paper d'un tercer element, cada cop més dominant al paisatge i menys porós: la matriu més o menys artificialitzada on es concentra l'activitat humana. Considerar aquest element en el funcionament ecològic del territori juntament amb la xarxa d'espais protegits és un pas necessari. És també un repte important, ja que implica la incorporació de criteris de sostenibilitat dins les diverses polítiques sectorials, les quals han de permetre arribar a un compromís entre preservació i desenvolupament.

Agraïments

La realització d'aquest treball ha estat possible gràcies a un conveni amb el Servei d'Acció Territorial de la Diputació de Barcelona. Els autors agraeixen les aportacions al manuscrit fetes per J. Germain, de la ICHN, i per F. Lloret i E. Pla, del CREAM; i la col·laboració en la recerca d'informació bibliogràfica per part de D. Saurí i F. Breton, del Departament de Geografia de la UAB.

Bibliografia

- ARONSON, J. & LE FLOC'H, E. 1996. Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology. *Restoration Ecology* 4: 377-387.
- BENNETT, G. & WOLTERS, R. 1996. A european ecological network. In: *Perspectives in ecological networks* (P. Nowicki, G. Bennett & D. Middleton. Eds.) ECNC. Arnhem, Holanda. p. 11-17.
- BIELSA, I. 1996. Designing ecological networks at regional scale with G.I.S. A case study in the Ebro basin (NE Spain). Projecte de mestratge inèdit. Wageningen Agricultural University.
- BOLÓS, M. de 1992. Manual de ciencia del paisaje; teoría, métodos y aplicaciones. Masson, Barcelona.
- COLVILLE, D. 1995. Ecological landscape analysis using GIS. In: *Landscape ecology in land use planning. Methods and practice*. (G. Domon & J. Falardeau. Ed.). Canadian Society for Landscape Ecology and Management. Polyscience Publications Inc. Morin Heights. Canadà. p. 143-148.
- CROW, T. R. 1991. Landscape ecology: the big picture approach to resource management. In: *Challenges in the conservation of biological resources*. (D. J. Decker, M. E. Krasny, G. R. Goff, C. R. Smith, & D. W. Gross. Eds.). Westview Press. Boulder (Colorado). p. 55-65.
- DIEGO, F.; MARTÍN, J. & RIBAS, J. 1994. Connexions biològiques entre els espais d'interès natural del Vallès. Criteris de conservació. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Direcció General de Patrimoni Natural. Inèdit.
- FARINA, A. 1998. Principles and methods in Landscape Ecology. Chapman & Hall. Londres.
- FORMAN, R. T. T. 1995. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology* 10: 133-142.
- FORMAN, R. T. T. 1997. Land mosaics. The ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press, Cambridge.
- FORMAN, R. T. T. & GODRON, M. 1986. Landscape ecology. John Wiley & Sons. Nova York.
- FORTIÀ, R. 1995a. La gestió dels recursos i el territori: els corredors biològics. *Revista de Girona* 172: 44-48.
- FORTIÀ, R. 1995b. Disseny d'estructures de connexió biològica. *Revista de Girona* 173: 42-47.
- GAONA, P.; FERRERAS, P. & DELIBES, M. 1998. Dynamics and viability of a metapopulation of the endangered Iberian lynx (*Lynx pardinus*). *Ecological monographs* 68: 349-370.
- GONZÁLEZ-BERNÁLDEZ, F. 1981. Ecología y paisaje. Blume, Madrid.
- MALLARACH, J. M. 1993. Estudi de diagnosi i aplicació al Pla d'Espais d'Interès Natural de Catalunya de les experiències sobre corredors biològics als Estats Units d'Amèrica. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Direcció General de Patrimoni Natural. Inèdit.
- MACARTHUR, R. H. & WILSON, E. O. 1967. Theory of Island Biogeography. Princeton University Press. Princeton. Edició catalana (1983). Moll. Ciutat de Mallorca.
- MEFFE, G. K. & CARROLL, C. R. 1994. Principles of conservation biology. Sinauer Associates, Inc. Sunderland.
- MÚGICA, M. 1994. Modelos de demanda paisajística y uso recreativo de los espacios naturales. Tesi doctoral inèdita. Centro de Investigación de Espacios Naturales Protegidos Fernando González Bernáldez. Madrid.
- NOGUÉ, J. 1984. Geografia humanista i paisatge. Una lectura humanista del paisatge de la Garrotxa a través de la literatura i de cinc grups d'experiència ambiental. Tesi doctoral inèdita. Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona.
- TERRADAS, J. 1976. Orientacions per a una gestió ecològica dels Països Catalans. In: *Natura, ús o abús? Llibre blanc de la gestió de la natura als Països Catalans* (R. Folch. Ed.). Barcino, Barcelona. p. 439-448.
- TURNER, M. 1989. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20: 171-197.
- WIENS, J. A. 1997. Metapopulation dynamics and landscape ecology. In *Metapopulation biology. Ecology, genetics and evolution* (I. A. Hanski & M. E. Gilpin. Eds.). Academic Press, San Diego. p. 43-62.
- ZONNEVELD, I. S. 1995. Land mosaics. SPB Academic Publishing. Amsterdam.