

# EL ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN ESPACIAL DEL PAISAJE: APROXIMACIÓN METODOLÓGICA Y APLICACIÓN A UNA ZONA PILOTO

Calatayud, T. (1) y Velarde M.D. (2)

- (1) Teresa Calatayud Prieto. Dra. en Biología por la Universidad Politécnica de Madrid. C/Hiedra 173. 28109 Alcobendas, Madrid. [teresa.calatayud@telefonica.net](mailto:teresa.calatayud@telefonica.net)
- (2) M<sup>a</sup> Dolores Velarde Catolfi-Salvoni. Dra. Ingeniero de Montes. Profesora Asociada de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid C/Tulipan s/n. 28933 Móstoles, Madrid. [mariadolores.velarde@urjc.es](mailto:mariadolores.velarde@urjc.es)

**Mesa Temática 1:** Caracterización, dinámica y biodiversidad de los ecosistemas forestales.

## Resumen

Se ha realizado un estudio científico para analizar las tendencias del cambio del paisaje. Se trata de procedimientos sencillos que, sin perder el rigor científico, permiten una aplicación práctica de los resultados obtenidos, tal y como se ha comprobado al aplicarlos con éxito a la descripción de los cambios de paisaje en la Comarca de Torrelaguna en Madrid. Las metodologías que operan con un número reducido de descriptores estructurales e índices que no presentan gran complejidad, han ofrecido mejores posibilidades de aplicación en los estudios realizados. Se concluye también que basta con un número pequeño de unidades de paisaje, representativo de los principales usos del suelo existentes, para describir satisfactoriamente la transformación producida en el mismo.

## Palabras Clave

Ecología del Paisaje, Índices, Matrices de transición, Adyacencia, Geometría fractal

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del paisaje y de los cambios a que se ve sometido resulta cada día de mayor interés, debido principalmente al alcance de las repercusiones que estos cambios tienen sobre el equilibrio ecológico, la economía y la sociedad en general.

El objeto del estudio realizado y cuyas conclusiones se exponen a continuación ha sido ahondar en dicho conocimiento con el fin de encontrar parámetros descriptores de los cambios que se producen en el paisaje que, por su sencillez y facilidad de obtención (a partir del perímetro, el área y el número de manchas), hagan posible su utilización en el ámbito de la planificación física, la ordenación paisajística y los estudios de transformación del paisaje.

Las causas del cambio del paisaje pueden ser múltiples: procesos bióticos, abióticos, económicos, sociales,... Éstas provocan un cambio en la estructura del paisaje rural, cuyas consecuencias son la modificación del equilibrio ecológico, pérdida de las señas de identidad, posibilidad de inducir riesgos, modificaciones climáticas, pérdidas económicas, etc.

El enfoque que se aborda sobre del paisaje está muy unido a la ecología; se basa en que el funcionamiento de las manchas de paisaje equivale al funcionamiento de los ecosistemas, es decir, una determinada estructura equivale a una determinada función ecológica. Se entiende por tanto el paisaje como manifestación externa de la realidad territorial, es decir, el paisaje “ecológico-visual”.

La presente metodología tiene, en definitiva, por objeto establecer métodos sencillos y de fácil aplicación, que ayuden al análisis de los cambios en el paisaje utilizando datos asequibles y cuya interpretación sea sencilla.

## 2. METODOLOGÍA

Para el análisis metodológico de la transformación espacial del paisaje se ha llevado a cabo un análisis crítico de diferentes métodos e índices, utilizando los siguientes criterios de selección: la idoneidad del método a los objetivos, la utilización de datos simples (de fácil obtención con un Sistema de Información Geográfica), la facilidad de aplicación e interpretación y su aplicación con éxito previamente.

Así, en el estudio científico se han analizado los siguientes procedimientos para la descripción de los cambios en el paisaje: matrices de transición, índices de diversidad, índices de adyacencia y contagio y geometría fractal.

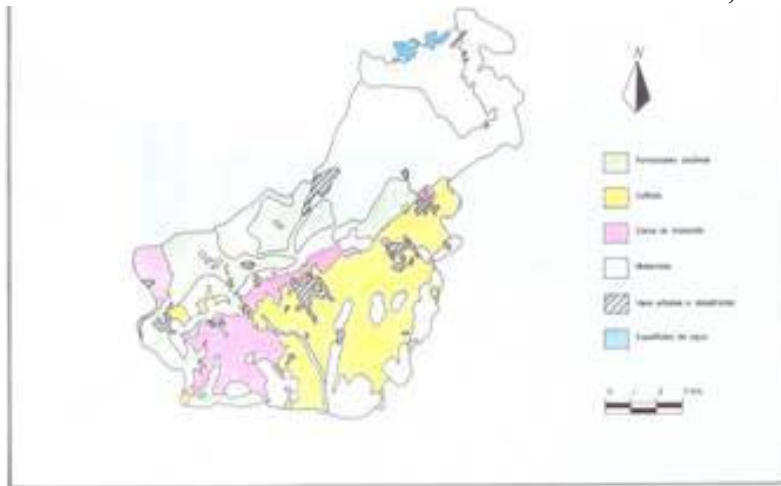
Las consideraciones teóricas derivadas de su estudio se han aplicado sobre una zona piloto en la Comarca de Torrelaguna, una zona de paisaje eminentemente rural, diverso, con baja presión

urbanizadora, pocos estudios zonales disponibles y cercano a Madrid.



Vista panorámica de la Comarca de Torrelaguna

Para ello se han definido y descrito unidades de paisaje, considerando 46 tipos de unidades de paisaje y una segunda agrupación en seis tipos (agrupaciones arbóreas, cultivos, zonas de transición, matorral, usos urbanos e industriales y superficies de agua) con objeto de comparar los resultados al aplicarlos en ambos casos. Se han tomado datos en tres años diferentes: 1956, 1972 y 1991.



Mapa de paisaje - 1991  
Agrupación en 6 tipos de unidades

Los resultados obtenidos se exponen a continuación.

## 2.1. Matrices de transición

Estas matrices sirven para saber “cuánto, qué y en qué” se produce el cambio paisajístico, es decir, para conocer los cambios cualitativos y cuantitativos del paisaje, la velocidad del cambio, y la predicción de futuras tendencias, esto es, el diseño del modelo de cambio.

Los datos para la elaboración de las matrices (número de manchas presentes en el paisaje, sus superficies y sus proporciones) se obtienen con relativa facilidad a partir de un SIG. El cambio se puede cuantificar viendo la proporción de cada clase de paisaje que ha pasado a otras clases en el periodo estudiado. La expresión de todos estos datos se reúne en la matriz de transición.

El modelo de cambio se basa en el modelo de cadena de Markov de primer orden, esto es, aquel en que la condición actual del sistema contiene la información necesaria para conocer su desarrollo futuro (una vez conocida la matriz de transición). Dicho modelo es el siguiente:

$$S_{i(t+1)} = P^T * S_{it}$$

Siendo:  $S_{it}$  = superficie de paisaje tipo  $i$  en el año  $t$   
 $P^T = P_{ij}$  = proporción de paisaje tipo  $i$  que se transforma en tipo  $j$  en un tiempo  $\Delta t$

$$\begin{pmatrix} S_{1(t+1)} \\ S_{2(t+2)} \\ \dots \\ S_{n(t+n)} \end{pmatrix} = P^T * \begin{pmatrix} S_{1t} \\ S_{2t} \\ \dots \\ S_{nt} \end{pmatrix} \quad P^T = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{ij} & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}$$

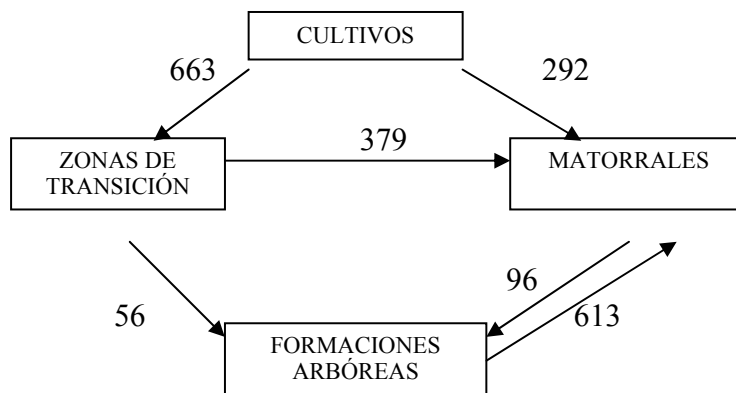
Los datos resultantes del uso de las matrices de transición deben interpretarse con cautela, aunque el modelo sigue siendo útil.

También permite establecer diagramas de flujos de cambio a partir de los datos más significativos de la matriz de transición, es decir, cuando la superficie que cambia es mayor de 100 has y su valor porcentual es mayor del 5%. A modo de ejemplo se muestra el siguiente caso, correspondiente al estudio práctico realizado en la comarca de Torrelaguna:

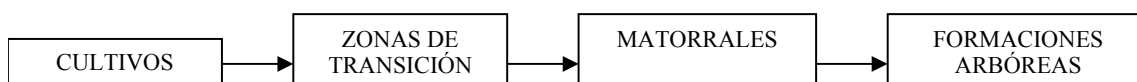
MATRIZ DE TRANSICIÓN  
(1956-1972)

56/72	Form. arbórea		Cultivos		Transición		Matorral		Urb. e ind.	
	Ha	% tipo	Ha	% tipo	Ha	% tipo	Ha	% tipo	Ha	% tipo
Form. Arb.	1.671	87,7	36,3	2	4,4	0,2	96,5	5,07	23,6	1,2
Cultivos	62,7	1,29	3818,2	78,2	663	13,5	291,9	6	48,2	1
Transición	56,4	7,1	8,4	1,06	349,2	43,8	379	47,4	3,4	0,43
Matorral	613,1	19	40	1,2	83,2	2,6	2480,3	76,6	22,07	0,68
Urb. e ind.	-	-	2,1	2,7	2,5	3,1	-	-	77,6	94,1

DIAGRAMA DE CAMBIO  
(1956-1972) (datos en has)



Al repetir el procedimiento con los cambios entre 1972 y 1991, el diagrama de flujos de cambio resultante es el siguiente:



Es decir, el seguimiento temporal de cada tipo de paisaje, se refleja en los diagramas de cambio, y el desarrollo de un modelo de cadena de Markov permite realizar una predicción de los futuros cambios, mostrándose como una herramienta útil para comparar un corto número de situaciones en el tiempo.

## 2.2. Índices de diversidad

Sirven para describir cómo se ha producido el cambio paisajístico. Según la ecología clásica, la diversidad es la “expresión de la cantidad y abundancia relativa de especies dentro de un conjunto”.

Se mide mediante el índice de Shannon-Weaver (1949):

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i$$

Siendo m = número de especies  
 P<sub>i</sub> = proporción de especie i

La diversidad puede ser un indicador de la estructura espacial. Por ejemplo, un mayor número de tipos de paisaje, una mayor fragmentación de las distribuciones, o mayor posibilidad de interrelación entre tipos de paisaje, son rasgos de una mayor diversidad, así como la dominancia un rasgo de menor diversidad.

Sin embargo, tras su aplicación práctica puede decirse que la adaptación de este índice al estudio del paisaje no ha resultado especialmente reveladora. Se constata que los índices de diversidad, normalmente aplicados a comunidades de seres vivos o conjuntos de objetos sin connotación espacial, no se pueden transponer simplemente al análisis del paisaje, donde el componente espacial juega un papel importante en la diversidad del conjunto.

### 2.3. Índices de adyacencia y contagio

De forma general, los índices de conectividad o adyacencia y contagio indican si en un paisaje los distintos elementos que lo componen se encuentran distribuidos formando agregados o si están distribuidos al azar, sin pautas evidentes, y son sensibles al número de tipos de paisaje presentes. Se han analizado las virtualidades y limitaciones de algunos de estos índices, escogidos unos entre los ideados *ad casum* dentro de la ecología del paisaje y procedentes otros de campos distintos, pero adaptables en principio: índice C (O'NEIL *et al*, 1998), índices CR1 y CR2 de contagio relativo (LI & REINOLDS, 1993) e índice C<sub>rel</sub> de conectividad o conectancia relativa (MARGALEF, 1993).

RASGOS ESTRUCTURALES	VALORES DE LOS ÍNDICES C, CR1 y CR2
- Pocas manchas grandes y contiguas - Paisajes poco fragmentados	ALTOS
- Numerosas manchas pequeñas - Paisajes muy fragmentados	BAJOS

En cuanto al índice de conectividad (similar a los anteriores aunque de más sencilla aplicación), se ha analizado la posibilidad de transposición al campo paisajístico de la formulación de Margalef acerca de las conexiones entre especies en un ecosistema:

ECOSISTEMA	-----	PAISAJE
ESPECIES i, j	-----	TIPOS DE PAISAJE i, j
DENS. RELATIVAS P <sub>i</sub> , P <sub>j</sub>	-----	SUPERF. RELATIVAS P <sub>i</sub> , P <sub>j</sub>
Nº ESPECIES, n	-----	Nº DE TIPOS DE PAISAJE, n
INTENS. DE LA RELACIÓN ENTRE	-----	PROPABILIDAD DE COMPARTIR
ESPECIES i Y j, a <sub>ij</sub>		BORDE, a <sub>ij</sub> = b <sub>ij</sub> / b <sub>i</sub>

$$C_{rel} = \frac{\sum \sum a_{ij} P_i P_j}{\sum \sum P_i P_j}$$

ASPECTOS ESTRUCTURALES	VALORES DEL ÍND. DE CONECTIVIDAD C <sub>rel</sub>
- Configuraciones agregadas	ALTOS
- Config. desigualmente repartidas (dominancia)	ALTOS
- Configuraciones dispersas	BAJOS
- Config. equitativamente repartidas	BAJOS

Así pues, la conectividad, tal y como la describe Margalef, aplicada al estudio de la estructura del paisaje, puede indicar la agregación o dispersión de las manchas y resultar un indicador de su distribución espacial.

En su aplicación a la zona piloto, los cálculos se han realizado para los dos niveles de detalle contemplados en la descripción de las unidades de paisaje, 4 y 6 tipos, utilizando los valores de longitud de borde compartido entre manchas que se obtienen a través del Sistema de Información Geográfica ARCINFO. En general, los valores que toman los tres índices indican que el paisaje de la zona ha evolucionado hacia una configuración menos agregada, ligeramente más fragmentada. Todos los índices se muestran sensibles a la variación del número de tipos de paisaje: en el caso de C y CR su valor aumenta al incrementarse el número de tipos considerados y para  $C_{rel}$ , coincidiendo con lo esperado, su valor disminuye al aumentar el número de tipos. La disminución en el valor de este último índice parece indicar una disminución en el grado de dominancia existente y, por tanto, tendencia a una distribución más homogéneamente repartida (entre tipos) y algo más fragmentada.

#### - *Análisis del contagio*

Se ha aportado un nuevo procedimiento para detectar la posible existencia de contagio entre usos del suelo a lo largo del tiempo por el hecho de que sean adyacentes, mediante una aplicación del cálculo de probabilidades.

La idea de analizar el contagio en el tiempo, surge después de estudiar la adyacencia y ver que el mero cálculo de este factor no explica suficientemente la evolución temporal del paisaje, sino que solamente caracteriza la configuración espacial de las manchas del paisaje en cada época indicando su nivel de agregación. Se trató entonces de medir la posible existencia de contagio, es decir, ver hasta qué punto un determinado uso de suelo resulta “contagioso” en función de la adyacencia previa.

Por medio del análisis de los cambios habidos, se ha hecho estadísticamente la predicción de futuro, indicando la probabilidad de que un paisaje tipo *i* pase a tipo *j* de entre todos los tipo *i* que contactan con tipo *j*. Es posible conocer esta probabilidad gracias al proceso de digitalización de las manchas del paisaje, utilizando el SIG ARCINFO, que permite obtener los mapas de las transiciones, al superponer las coberturas del paisaje de cada periodo, dos a dos.

$$P_{(i \rightarrow j / i \subset j)} = \frac{P_{(i \subset j / i \rightarrow j)} P_{(i \rightarrow j)}}{P_{(i \subset j)}}$$

Se ha aplicado en Torrelaguna a la agrupación en 6 tipos de paisaje, en los espacios temporales 1956-72 y 1972-91, en dos supuestos: considerando el contacto en el año de origen y considerando el contacto en la etapa de transición. Las probabilidades calculadas en el año de origen sirven para establecer un modelo predictivo, mientras que las calculadas en la transición resultan útiles para explicar lo que ya ha ocurrido en cada periodo.

La aplicación puso de relieve un contagio temporal significativo del cultivo hacia zonas de transición, que presentan un grado variable de abandono, y de éstas a matorral (en menor medida un cambio del matorral hacia formación arbórea). Los resultados han sido mejores cuando se mide el contacto en la transición (al tener pocas manchas y un territorio poco extenso). Por el contrario, en territorios muy extensos y con gran cantidad de manchas se puede utilizar el análisis según el contacto en el año de origen, ya que desaparecen algunos inconvenientes derivados de la medida del contacto.

## 2.4. Geometría fractal

Una forma distinta de abordar la caracterización de la estructura espacial la proporciona la geometría fractal (MANDELROT, 1975). Es de reciente y frecuente utilización, e indica cómo se ha producido el cambio a partir de la forma de las manchas. La disposición territorial de los paisajes no puede describirse de forma clara mediante formas euclídeas como líneas, cuadrados, círculos o esferas, mientras que la geometría fractal se muestra como una herramienta útil para sintetizar la variación espacial de la naturaleza y describir pautas y estructuras de usos del suelo.

Así, la geometría fractal ha sido propuesta para caracterizar la forma y superficie de las manchas de usos de suelo y establecer relaciones con los procesos que las generan, así como para proponer

escalas adecuadas de estudio de procesos ecológicos. Describe la irregularidad de las formas mediante la dimensión fractal de las propiedades espaciales (perímetro y área):

P= Perímetro  
 A= Superficie  
 Relación A/P  
 d= dimensión fractal  
 (MANDELBROT, 1983)

$$\log P = \frac{1}{2} d \log A$$

Permite tratar numerosos objetos a la vez (mosaico de usos del suelo).

PAISAJES	VALORES DE d
- Con formas geométricas simples	BAJO (~ 1)
- Con formas geométricas complejas	ALTO (~ 2)

El análisis de la dimensión fractal se ha realizado para el conjunto de las manchas en las dos agrupaciones, 6 y 46 unidades. Se comprueba que el valor de la dimensión fractal para el conjunto del territorio disminuye, aunque levemente, al aumentar el número de manchas y ser éstas más pequeñas (caso de las 46 unidades). En el presente trabajo la dimensión fractal no ha resultado un indicador apropiado, ya que es poco sensible a los cambios del paisaje introducidos por el hombre, estudiados a escala 1:25.000. Se aprecia, sin embargo, que con el tiempo tanto los cultivos como las formaciones arbóreas incrementan su irregularidad, aunque en este último caso desde valores bajos de la dimensión fractal (atribuibles al gran tamaño de las manchas y al hecho de tratarse de repoblaciones). Estos resultados son acordes con las observaciones realizadas *in situ*.

### 3. CONCLUSIONES

La escala a la que puede aplicarse esta metodología es entre 1:50.000 y 1:25.000, dependiendo del territorio, el objetivo del estudio y la información disponible. En función de la escala se elegirán unos u otros parámetros descriptores y se definirá su nivel de detalle descriptivo.



Vista panorámica de la Comarca de Torrelaguna

El cálculo de las matrices de transición ha resultado de gran utilidad como fuente de información directa o en combinación con otros análisis. Por eso se considera que en el análisis de la transformación del paisaje las matrices de transición son una herramienta imprescindible, que permite además establecer diagramas y modelos de cambio y, en definitiva, predecir tendencias de futuros cambios paisajísticos.

Con relación a la adyacencia, su análisis indica un ligero aumento en el grado de fragmentación, así como una disminución de la dominancia para la zona de estudio, siendo este resultado concordante con las conclusiones que se obtienen cuando se analizan los datos del número total de manchas y longitud de borde compartido. La transposición al campo paisajístico de la formulación de Margalef acerca de las conexiones entre especies en un ecosistema es posible y proporciona resultados de interés.

El estudio del contagio en el tiempo entre tipos de paisaje y su inclusión en los modelos de cambio, resulta de gran interés en espacios naturales, donde las variables que controlan los cambios son también naturales. Sin embargo, en nuestros paisajes, fuertemente humanizados, esto no es así, y por tanto, el contagio en muy pocos casos puede utilizarse en un modelo de cambio. Únicamente cabe estudiar el contagio periodo a periodo, como dato explicativo de lo que ha ocurrido, pero no resulta extrapolable a un futuro próximo.

En cuanto a la geometría fractal, se constata que el recurso a su utilización ha constituido una verdadera explosión en los últimos años en el análisis de los aspectos estructurales del paisaje, sin entrar en sus virtualidades y limitaciones. Su idoneidad reside en que permite tratar el mosaico de manchas de usos del suelo de forma holística y proporcionar información sobre su complejidad formal.

En un plano general, y a modo de síntesis, cabe concluir que las metodologías que operan con un número reducido de descriptores estructurales e índices que no presentan gran complejidad, ofrecen mejores posibilidades de aplicación en los estudios de cambio de paisaje.

Finalmente, se concluye también que con un número pequeño de unidades de paisaje (seis en este estudio), representativo de los principales usos del suelo existentes, se pueden describir satisfactoriamente los cambios producidos en el paisaje.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

- BAUDRY, J. & BUREL, F., 1990. Hedgerow network patterns and processes in France. In I.S. Zonneveld & R.T.T. Forman (Eds). *Changing landscapes: an ecological perspective*. Springer Verlag. New York.
- CALATAYUD, T., 1997. *Análisis Metodológico de la Transformación Espacial del Paisaje Aplicación a una zona piloto: comarca de Torrelaguna*. Tesis Doctoral. E.T.S.I. de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- DUNN, C.P. et al, 1991. Methods for analyzing temporal changes in landscape pattern. In: M.B.Turner and R.H. Gardner (Eds.) *Quantitative methods in landscape ecology*, pp. 173-198. Springer-Verlag. New York.
- FAHRIG, L. & MERRIAM, G., 1985. Habitat patch connectivity and population survival. *Ecology*, 66: 1762-1768.
- FORMAN, R.T.T., 1995. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. Cambridge, USA.
- GARDNER, R.H. & O'NEILL, R.V., 1991. *Pattern, process and predictability: the use of neutral models for landscape analysis*. In: M.G. Turner y R.H. Gardner (Eds.) *Quantitative methods in landscape ecology*, pp.289-307. Springer-Verlag. New York.
- GUSTAFSON, J. & PARKER, G.R., 1992. Relationships between landcover and indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 7: 101-110.
- LI, H. & REINOLDS, J.F., 1993. A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*, 8: 155-162.
- MANDELBROT, B. 1975. *Los objetos fractales*. Tusquets. Barcelona.
- MANDELBROT, B. 1983. *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman. New York.
- MARGALEF, R., 1993. *Teoría de los sistemas ecológicos*. Universidad de Barcelona.
- MEENTEMEYER, V., 1989. Geographical perspectives of space, time and scale. *Landscape Ecology*, 3: 163-173.
- MERRIAM, G. Et al., 1991. *Landscape dynamics models*. In: M.G. Turner y R.H. Gardner (Eds.) *Quantitative methods in landscape ecology*. Pp. 399-416. Springer-Verlag. New York.
- O'NEILL, R.V. et al., 1988. Indices of landscapes pattern. *Landscape Ecology* 1: 153-162.
- RAMOS, A. Et al. 1989. Modelos numéricos en evaluación del paisaje y EUA. *Arbor*, febrero-marzo, 518-519. CSIC, Madrid.

- RITTERS, L.H. et al., 1995. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 10: 23-39.
- SMARDON, R.C. et al., 1986. *Foundations for visual project analysis*. Wiley-Interscience. New York.
- TURNER M.G. 1989. Landscape Ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecological and Systematics*, 20: 171-197.
- ZONNEVELD, I.S., 1989. The land unit: a fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology* 3, 2: 67-86.