4. Clasificación jerárquica y cartografía de ecosistemas

4. Clasificación jerárquica y cartografía de ecosistemas

Para el desarrollo de modelos de gestión que permitan la coexistencia armónica y equilibrada entre la explotación de recursos y el mantenimiento de la integridad y salud ecológica de los ecosistemas, hace falta que éstos sean en primer lugar definidos, a diferentes escalas espaciales, como un determinado tipo genético-funcional, y en segundo lugar, dimensionados en un espacio geográfico concreto; en otras palabras, tienen que ser clasificados funcionalmente y cartografiados. En este contexto, la aproximación ecosistémica a través de la clasificación jerárquica permite inventariar y cartografiar los ecosistemas de un territorio y por tanto, indirectamente darle una expresión espacial a los valores instrumentales de los recursos que estos representan. Asimismo posibilita la elección del mapa a la escala más adecuada, escala a la que se recoge con mayor garantía la estructura ecológica de un espacio concreto. La clasificación jerárquica constituye una herramienta básica de la planificación integrada, ya que las clases obtenidas a diferentes escalas, o lo que es lo mismo, los ecosistemas definidos escalarmente por su integridad, constituyen la base para el diagnóstico y la evaluación de la aptitud o vocación de un espacio para un determinado uso (Figs. S.1 y S.2.).

4.1. La Clasificación del medio natural entendido como una jerarquía de ecosistemas interdependientes

Una vez organizado jerárquicamente el medio natural en sus componentes estructurales y funcionales básicos y delimitadas sus dimensiones espaciales y temporales, es necesario desarrollar un procedimiento de clasificación u ordenación sistemática de las unidades funcionales (ecosistemas) que lo constituyen para posteriormente referenciarlos en un mapa. Además, habida cuenta de que las pautas repetitivas de distribución y comportamiento de sus componentes se manifiestan a diferentes escalas espaciales, es necesario elaborar diferentes niveles de clasificación junto con un reconocimiento cartográfico a cada escala.

La clasificación ha sido utilizada desde siempre por científicos y gestores ya que permite caracterizar y ordenar una vasta información sobre la variabilidad espacial y temporal de entidades complejas, agrupándolas o subdiviéndolas en categorías o clases más o menos homogéneas para una serie de propiedades o atributos (Naiman *et al.,* 1992). La clasificación de ecosistemas constituye una de las etapas básicas e iniciales en el proceso de evaluación y análisis de los recursos que éstos representan (González Bernáldez, 1982). Supone, junto con el inventario, una de las fases iniciales de cualquier programa de investigación aplicado a la gestión del medio natural. Se trata, en última instancia, de un instrumento sumamente eficaz para alcanzar un sólido conocimiento de la variedad y situación de los diferentes ecosistemas acuáticos y terrestres que sostienen el cuerpo de recursos naturales y potenciales de un territorio; es decir, cuántos y qué tipos de ecosistemas componen ese medio natural.

Existen dos aproximaciones al desarrollo de sistemas de clasificación ecológica y por consiguiente de cartografía del medio natural (Udo de Haes & Klijn, 1994; Zonnelveld, 1994). Por un lado, se encuentra el *enfoque deductivo* que parte de una teoría, suposición o hipótesis acerca de cómo se organiza y funciona el medio natural, condicionando desde un primer momento las directrices de la clasificación y la cartografía. En él, se parte de una clasificación de unidades naturales que es evaluada, durante todo el desarrollo del trabajo, por ciclos de control en función de los resultados que se van obteniendo. Hay que tener en cuenta

que las teorías e hipótesis que se manejan se fundamentan en investigaciones sólidas y en el conocimiento y experiencia de los investigadores.

Frente a este modo de proceder mediante la deducción a partir de la teoría, se encuentra la inducción a partir de los datos de base. Bajo el *enfoque inductivo* se llega a un sistema de clasificación o síntesis del medio natural sin ningún postulado de partida. No se parte, pues, de una clasificación tentativa de unidades naturales. En principio, no se presta una especial atención a ningún compartimento, proceso o interacción en particular hasta que no se evalúa su comportamiento en el conjunto del sistema. Desde esta perspectiva, por tanto, ningún elemento del ecosistema tiene, *a priori*, más peso específico que otro a la hora de elaborar una clasificación de unidades naturales. Esta aproximación pone un especial énfasis en la selección de múltiples variables bióticas y abióticas (indicadores ecológicos) del medio natural y en su muestreo. El análisis numérico del considerable conjunto de variables que se emplea, se lleva a cabo mediante métodos estadísticos multivariantes que permiten considerar y analizar el medio natural como un sistema multidimensional (Martín de Agar *et al.*, 1995). Las semejanzas y diferencias entre unidades emergerán del análisis de los datos.

El sistema de clasificación ecológica del medio natural que se ha seguido en nuestro trabajo, se ajusta al enfoque deductivo, ya que emplea como principio conceptual guía el modelo de organización jerárquica y funcionamiento de los ecosistemas. Este modelo permite identificar, priorizar, sintetizar y cartografiar los principales factores de control, procesos genéticos y patrones ecológicos que determinan la estructura, funcionamiento y dinámica es decir, la integridad de los ecosistemas de un territorio. El modelo seguido se presenta no como un conjunto rígido de normas y procedimientos, sino como un marco conceptual y metodológico de integración transdisciplinar, donde las diferentes disciplinas que intervienen en el proceso de investigación comparten, como hemos indicado anteriormente, tanto el objeto de estudio como los objetivos y la metodología general.

Como se explicó en el apartado 3.4.3. los componentes estructurales y funcionales de los ecosistemas se expresan a diferentes escalas espaciales, por lo que un medio natural concreto puede caracterizarse a distintos niveles de homogeneidad para un conjunto de compartimentos abióticos o bióticos (relieve, hidrología, suelo, vegetación, etc.). Esto implica que los ecosistemas pueden, en primer lugar definirse, es decir, clasificarse, y posteriormente reconocerse espacialmente, o sea, cartografiarse a diferentes escalas espaciales que abarcan desde grandes zonas climáticas hasta un pequeño prado, una charca o incluso entidades de dimensiones más pequeñas. En este proceso se parte de un ecosistema definido a una escala espacial amplia, o "Gran Ecosistema", en el que se van introduciendo, paso a paso, niveles de subdivisión o escalas espaciales de más detalle que permiten reconocer ecosistemas de menor tamaño. Constituye un procedimiento de *clasificación por subdivisión* o descendente (Zonneveld, 1994). Este sistema de clasificación es el más adecuado para el análisis de un medio natural formado en su conjunto no por entidades discretas sino por un *continuum* o gradientes ecológicos que intentamos fraccionar al objeto de clasificar los distintos tipos de ecosistemas o paisajes percibidos.

La clasificación jerárquica permite caracterizar y analizar las pautas de distribución, la estructura y los procesos que caracterizan a los ecosistemas a distintas escalas espaciales. Se trata de una aproximación absolutamente necesaria, ya que los procesos esenciales que determinan la integridad de los ecosistemas operan en un amplio rango de magnitudes. Para el caso de Doñana, y a partir de una escala de detalle, los ecosistemas se expresan espacialmente en un rango desde m^2 hasta superficies superiores a 10^2 Km^2, y

temporalmente desde décadas hasta 10^5 años. De esta forma podemos considerar ecosistemas a una escala tan amplia como el de la *Marisma del Guadalquivir*, con 1.650 Km^2, o tan pequeña como unos pocos m^2 para en el caso de las descarga hídrica permanente u *Ojo de la marisma.* Además, el hecho de que la clasificación jerárquica pueda incluir escalas con amplias dimensiones temporales como a las que se expresan los procesos geológicos o climáticos, permite darle también una perspectiva biogeográfica y evolutiva.

La clasificación y cartografía de ecosistemas obtenida por este procedimiento es pues, por definición, de carácter jerárquico. Esta jerarquía debe entenderse como una categorización escalar de ecosistemas asociados por las mismas dimensiones espaciales. Hay que tener presente, no obstante, que una clasificación de ecosistemas, por el mero hecho de tener una organización jerárquica, no tiene por qué seguir conceptualmente la teoría jerárquica de sistemas. A este respecto, Klijn (1994) distingue entre clasificaciones que poseen una estructura jerárquica sistemática (agrupación por similaridades sin considerar la escala) y las que realmente se basan en una jerarquía escalar.

Dada la naturaleza multidimensional del medio natural, la clasificación de ecosistemas debe ser *multifactorial,* necesitando de métodos combinados con los que poder identificar tanto las características de mayor valor predictivo, como las de más alta capacidad sintética, recogiendo así su heterogeneidad ecológica.

De igual modo, y ya que la clasificación jerárquica atiende por encima de todo a las relaciones causales que determinan la integridad ecológica de los ecosistemas y se fundamenta en las transferencias de materia y energía entre ellos, el carácter *genetico-funcional* debe presidir su sentido último. En efecto, la clasificación jerárquica se basa más en las causas que generan las diferencias entre las clases que, como suele ser habitual, en los efectos que dichas desemejanzas producen (p.e. diferentes tipos de comunidades biológicas). Las clasificaciones genéticas, por tanto, tienen siempre presente la ontogenia de los factores de control que explican las pautas de heterogeneidad ecológica de un medio natural (incluyendo la paisajística). Así, al igual que en una clasificación sistemática de organismos, éstos se identifican por sus características morfológicas y se definen taxonómicamente por su filogenia, en una clasificación de ecosistemas se les reconoce por las características paisajísticas propias del fenosistema (litología, matorral, agua, etc.), y se los define genetico-funcionalmente por el origen de los procesos que subyacen y determinan la escena percibida (morfogénesis, edafogénesis, génesis de flujos de agua, etc.). En este contexto, los procesos morfogenéticos adquieren un papel relevante ya que interaccionan, de una forma intensa, con el resto de los componentes del ecosistema, especialmente con los procesos edafogenéticos. El dinamismo de los sistemas ecológicos va a depender en gran medida de las variaciones espacio-temporales del balance morfogénesis/edafogénesis (Tricart & Kilian, 1979).

Por otro lado, la clasificación de ecosistemas debe utilizar como espacio de referencia la cuenca hidrográfica, o sistema geográfico de drenaje superficial y subterráneo, ya que constituyen las entidades territoriales mínimas de interacción del ciclo hidrológico con la biosfera (White *et al.,* 1992). Gran parte de los procesos que tienen lugar a nivel de cuenca quedan reflejados, con mayor o menor intensidad, en la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas afectados por los flujos de agua del sistema de drenaje superficial o subterráneo que, además, es el responsable, en gran medida, del grado de interconexión entre los ecosistemas del espacio delimitado por la divisoria de aguas superficiales o subterráneas. Por este motivo, los ecosistemas deben analizarse de acuerdo con las características de las

cuencas de drenaje o unidades hidrológicas e hidrogeológicas donde se localizan. Las cuencas hidrográficas, por tanto, constituyen desde la perspectiva ecosistémica, las unidades básicas de gestión dentro de la planificación ecológica o integrada del territorio (Slocombe,1993a).

Otro aspecto básico en la clasificación y cartografía de ecosistemas, desde la perspectiva jerárquica, es la adecuada selección de propiedades y atributos que van a servir por un lado para definirlos y clasificarlos, y por otro para reconocerlos y delimitarlos en un mapa. En esta línea argumental, Udo de Haes & Klijn (1994) y Zonnelveld (1994) reconocen dos tipos de propiedades, las denominadas *características para la clasificación* y *características para la cartografía.*

Las características relacionadas con la clasificación responden a los procesos genéticos responsables de la estructura biofísica y funcionamiento de los ecosistemas. Estas propiedades se emplean en la definición de los distintos tipos de ecosistemas de un territorio que, posteriormente, van a quedar reflejados en la leyenda del mapa. Por tal motivo, para la clasificación es necesario utilizar factores de control, es decir aquellos que gobiernan los procesos que dan lugar a los patrones de distribución, organización, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas, y por tanto a su integridad a diferentes escalas espaciales (apartado 3.4.3.). Así, por ejemplo, los factores y procesos climáticos y geológicos son adecuadas en la definición de ecosistemas a escalas espaciales grandes, mientras que los porcesos edafogenéticos o fototróficos lo son para ecosistemas a escalas pequeñas.

Dentro de la organización jerárquica de ecosistemas, los factores de control y los procesos que condicionan su génesis y funcionamiento poseen una gran capacidad de diagnóstico de todo el sistema, ya que se encuentran fuertemente correlacionados con otras características. Una buena selección de estos factores y procesos, a diferentes escalas espaciales, permite obtener una ajustada estimación de un considerable número de otras características, no medidas, que también forman parte del mismo sistema ecológico.

Respecto a las características para la cartografía de ecosistemas se emplea cualquier propiedad que sirva para reconocer espacialmente los ecosistemas, tanto en campo como a partir de la foto aérea o las imágenes de satélite. A diferencia de las anteriores, las características cartográficas se eligen por su capacidad para reconocer y delimitar los diferentes tipos de ecosistemas definidos en la clasificación, y no por su importancia en el funcionamiento del sistema (Bailey, 1987). Deben ser fácilmente reconocibles y medibles en campo, por lo que generalmente se relacionan con las características estructurales de los ecosistemas. Las relacionadas con su funcionamiento no suelen percibirse directamente. Aunque las características para la cartografía pueden coincidir con factores de control, no tienen porqué determinar la integridad de los ecosistemas, sólo tienen que servir para identificarlos y delimitarlos.

Aunque en cada nivel jerárquico todas las propiedades de sus componentes son relevantes para determinar sus patrones de comportamiento, la importancia relativa de los factores de control cambian según las distintas escalas espaciales. De esta forma, las mismas características de clasificación no son adecuadas para todas las escalas espaciales consideradas. Cada componente de los ecosistemas define un patrón de comportamiento a una escala espacial determinada. Así, las características climáticas sirven para explicar, en términos generales, patrones de distribución de los procesos morfogenéticos, aunque para dar una explicación correcta de la distribución de los diferentes tipos de relieve es necesario dar entrada, en el

conjunto de propiedades determinantes o factores de control, a otras características como las litológicas o, incluso, los efectos heredados del modelado.

Dado que la clasificación jerárquica requiere de la identificación de unos pocos factores de control, el modelo jerárquico de ecosistemas puede utilizarse a su vez como una herramienta para seleccionar las características más adecuadas para la clasificación a diferentes escalas espaciales. Esto es importante desde el punto de vista de la gestión, ya que el gestor necesita estrategias técnicas que impliquen un número reducido de factores que suministren información con un gran potencial de explotación. Una estructura jerárquica en el sistema de clasificación también facilita considerablemente el almacenamiento y recuperación de la información.

En síntesis, el modelo jerárquico viene a simplificar considerablemente el número de características de clasificación, ya que la jerarquía de relaciones de dependencia de los componentes del ecosistema permite categorizar y priorizar los factores de control necesarios para el desarrollo de una clasificación de los sistemas ecológicos de un territorio. Según el problema ambiental planteado, algunos factores de control con una dimensión temporal y espacial muy amplia pueden suponerse constantes, no siendo necesario considerarlos a la hora de diseñar determinadas medidas de gestión.

No obstante, las clasificaciones de ecosistemas a diferentes escalas espaciales u ordenación sistemática de unidades funcionales o entidades sistémicas de interacciones biofísicas que implican una regionalización jerárquica del territorio, no son algo nuevo (González Bernáldez, 1981; Bailey, 1981; Moreira, 1991; Klijn & Udo de Haes, 1994). Los antecedentes históricos de las denominadas *prospecciones o reconocimientos integrados*, que no temáticos (geomorfología, suelos, vegetación, etc.), del territorio que implican clasificaciones jerárquicas y cartografías integradas o ambientales, se encuentran en las prospecciones territoriales del CSIRO (Commonwealth Scientifical Industrial Research Organization) en Australia (Christian & Steward, 1968) y del International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC) en Holanda (Verstappen & Van Zuidam, 1969), así como en las llamadas investigaciones paisajísticas desarrolladas en la antigua Unión Soviética (Solntev, 1962; Isachenko, 1973). Todas ellas fueron realizadas con el objetivo de evaluar, de una forma rápida y simple, la vocación y potencialidades de uso de grandes territorios despoblados, basando su regionalización ecológica en procedimientos de fotointerpretación mediante el uso de la fotografía aérea y controles de campo. Dentro de esta misma línea se podrían incluir las clasificaciones ecológicas elaboradas en Canadá y Estados Unidos (Wiken & Ironside, 1977; Bailey *et al.*, 1985; Bailey, 1995; 1996).

En Europa, siguiendo procedimientos de fotointerpretación similares, aunque con algunas diferencias conceptuales y poniendo un mayor énfasis en los trabajos de campo, se pueden encontrar múltiples clasificaciones integradas desarrolladas y aplicadas en distintos países como Alemania (Haase, 1989), Inglaterra (Brink *et al.*, 1965), Francia (Bertrand, 1968), Holanda (Klijn, 1988) y también en España (González Bernáldez, 1973a,b; 19976) y en la propia Andalucía (de la Rosa & Moreira, 1987). A diferencia de las clasificaciones anteriores, éstas últimas se han aplicado sobre territorios bastante habitados y con el objetivo básico de solucionar problemas de ordenación territorial. También las clasificaciones europeas, al seguir el cuerpo conceptual de la escuela alemana de paisaje (Troll, 1950; Neef, 1967), su jerarquía de clases o niveles espaciales se fundamenta más en los aspectos funcionales del territorio que en los fisonómicos. Algo similar ha ocurrido con la clasificación jerárquica de la antigua URSS, que también hace especial hincapié en el funcionamiento del territorio, ya que sigue la tradición de la escuela soviética de

paisaje plenamente volcada sobre los aspectos de transferencias de sustancias entre compartimentos alrededor de la denominada Geoquímica del paisaje (González Bernáldez, 1981).

Un análisis comparativo de la nomenclatura empleada en la definición de las clases dentro de las distintas clasificaciones elaboradas (Tabla 4.1.), pone de manifiesto los distintos criterios y aproximaciones que se han empleado para su desarrollo. El resultado de esta gran variedad de clasificaciones es que se han generado graves problemas de homologación de conceptos, metodologías y terminologías.

Tabla 4.1. Comparación de la nomenclatura de distintas clasificaciones ecológico-jerárquicas del territorio. Las clases que son comparables se situan al mismo nivel (según Bailey, 1981)

AUSTRALIA	URSS	CANADA	ESTADOS UNIDOS	GRAN BRETAÑA
			Domain	
			División	Land zone
	Landshaft	Ecoregion	Province	Land Region
	Miesnot	Ecodistric	Section	Land Distric
Land System		Ecosection	Distric	Land System
	Urochische	Ecosite	Landtype Association	Land Type
Land Unit				
Land Type			Land Type	Land Pahse
Site		Ecoelement	Landtype Phase	
	Fatsiya		Site	

En los primeros años de la década de los noventa Klijn (1991, 1994) y Klijn & Udo de Haes (1994) elaboraron una clasificación deductiva y sistémica de territorios basada en el modelo de organización jerárquica y funcionamiento de ecosistemas. Al mismo tiempo, y al objeto de estandarizar terminologías, propusieron una nomenclatura, en gran parte tomada de las propuestas americana y canadiense, para referirse a las escalas espaciales en que se expresan las características estructurales y funcionales que determinan la integridad de los ecosistemas a cada nivel de la clasificación. El resultado es una clasificación jerárquica de ecosistemas a diferentes escalas espaciales (Tabla 4.2.), cuya terminología seguimos, aunque con algún matiz, en el presente trabajo. Las ventajas de esta nomenclatura se basan, en primer lugar, en que con el empleo del prefijo "eco" se deja constancia de que el objeto a clasificar es un sistema de relaciones ecológicas y no una determinada componente del medio natural (geomorfología, suelo, vegetación); en segundo lugar utiliza una terminología que se corresponde con áreas de tamaño decreciente (zona, provincia, ecorregión, distrito, etc.); y por último en que es fácilmente traducible a casi todos los idiomas europeos (Klijn & Udo de Haes, *op.cit.*).

De este modo cuando utilizamos el término ecosistema de forma aislada, nos referimos a un tipo concreto de sistema de relaciones biofísicas sin especificar dimensiones. Pero si empleamos los vocablos de la nomenclatura de la citada clasificación jerárquica, estamos mencionando tipos de ecosistemas concretos referidos a una determinada escala espacial y temporal. Estamos aludiendo, en otras palabras, a cada uno de

los términos de la leyenda de las clases de los distintos niveles de la clasificación jerárquica. Por ejemplo, podemos hablar de ecosistemas de lagunas permanentes o de ecosistemas de bosques perennifolios, y estaremos refiriéndonos a un tipo general fisonómico de sistema ecológico sin especificar un dimensión determinada; pero si señalamos la *Ecosección del Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables* o el *Ecotopo Formación palustre hipogénica temporal estacional en paleodepresión eólica*, entonces estamos mencionando un tipo genético-funcional dentro de una clasificación jerárquica de ecosistemas a una escala espacial de km^2, en el primer ejemplo, y de hectáreas en el segundo. En cualquier caso, cada nivel, además de su expresión espacial, comporta tanto una escala temporal de formación como una escala temporal de permanencia, así como unas determinadas "tasas de cambio" (apartado 3.4.3.).

Tabla 4.2. Sistema de clasificación jerárquica de ecosistemas, a diferentes escalas espaciales, propuesta por Klijn (1991;1994) y Klinj & Udo de Haes (1994). Se indican para cada nivel de clasificación su denominación, escala cartográfica más usada y las características para la clasificación.

NIVELES DE CLASIFICACION	ESCALA CARTOGRAFICA INDICATIVA	UNIDAD CARTOGRAFICA BASICA	CARACTERISTICAS DE LA CLASIFICACION
ECOZONA	1: > 50.000.000	> 62.500 Km^2	Climáticas
ECOPROVINCIA	1: 50.000.000 - 10.000.000	62.500 - 2.500 Km^2	Geológicas y Geomorfológicas
ECORREGION	1: 10.000.000 - 2.000.000	2.500 - 100 Km^2	Litológicas y Geomorfólogicas
ECODISTRITO	1: 2.000.000 - 500.000	10.000 - 625 ha	Hidrología superficial y subterránea
ECOSECCION	1: 500.000 - 100.000	625 - 25 ha	Relieve, suelos
ECOSERIE	1: 100.000 - 25.000	25 - 1,5 ha	Condiciones que afectan directamente al crecimiento de la vegetación (suelo, régimen hidrológico)
ECOTOPO	1: 25.000 - 5.000	1,5 - 0,25 ha	Unidad espacial más pequeña que puede ser cartografiada como polígonos y posee una estructura de la vegetación homogénea
ECOELEMENTO	1: < 5.000	< 0,25 ha	Elementos puntuales no cartografiables como polígonos a escalas superiores

Uno de los resultados de la clasificación jerárquica es la propia leyenda de los mapas a distintos niveles escalares. Que la nomenclatura de las clases o unidades definidas a diferentes escalas espaciales recojan fielmente el marco conceptual y metodológico en que se encuadra no es un tema en absoluto baladí (Zonneveld, 1989), máxime en nuestros días, cuando los mapas tienden cada vez más a utilizarse independientemente de sus memorias. Es por ello que las leyendas deben ser claras e ilustrativas resumiendo los procesos genéticos responsables de las interrelaciones biofísicas esenciales que caracterizan la integridad de las unidades discriminadas, en nuestro caso, los ecosistemas cartografiados.

En suma, la clasificación jerárquica concibe el medio natural como un Gran Ecosistema constituido a su vez por un conjunto de ecosistemas de menor tamaño agrupados a distintas escalas espaciales desde ecozonas a ecoelementos. Se pone así de manifiesto las características sistémicas del medio natural de cualquier territorio entendido como un conjunto de ecosistemas interdependientes. En último término, la clasificación jerárquica permite describir la realidad ecológica de un territorio de una manera objetiva ya que recoge fielmente su estructura ecológica y da acceso al desarrollo de procedimientos de cartografía ecológica.

4.2. Cartografía ecológica: el mapa de ecosistemas a diferentes escalas espaciales

Como se indicó anteriormente, la vocación aplicada o instrumental de la clasificación jerárquica es la cartográfica, ya que al describir de una forma sinóptica e integrada la compleja realidad ecológica del medio natural, favorece el reconocimiento en campo y gabinete de los ecosistemas que lo integran a diferentes escalas espaciales. De modo complementario, el análisis de la dimensión espacial de los ecosistemas necesita ineludiblemente de la cartografía ecológica, dado que ésta es la fórmula idónea de describir sus patrones de distribución según la manifestación espacial de sus componentes. La cartografía ecológica constituye pues la herramienta principal para detectar, delimitar, caracterizar, describir y comprender los tipos genetico-funcionales definidos en las clasificaciones de ecosistemas a distintas escalas espaciales.

El objetivo básico de la cartografía ecológica es plasmar en un plano bidimensional (*mapa*) la síntesis de las relaciones ecológicas más significativas que tienen lugar en un determinado espacio geográfico. Esta tarea implica la delimitación, a distintas escalas espaciales, de unidades geográficas con características ecológicas comunes. Los mapas ecológicos no representan unidades geográficas aisladas sino que, al tratarse de ecosistemas, constituyen unidades funcionales abiertas e interrelacionadas por el intercambio de materia y energía; de ahí su gran utilidad en el estudio de las relaciones horizontales de un territorio y en el establecimiento de criterios para estudiarlo y gestionarlo como una entidad integrada.

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos de aproximarse a la representación espacial de ecosistemas (Fig. 4.1.). Uno de los procedimientos más utilizados es el que permite la obtención de *unidades* -tradicionalmente denominadas- *ambientales*, a partir de la superposición de mapas temáticos en los que se recoge la variabilidad espacial de los distintos compartimentos que conforman los ecosistemas de un territorio (Fig. 4.1.a.).

Bajo este enfoque metodológico se elaboran mapas temáticos, o se emplean otros ya existentes referidos a aspectos parciales del medio natural (mapas geomorfológicos, hidrológicos, de suelos, de vegetación y usos del suelo, etc.), los cuales se ordenan y superponen al objeto de obtener, mediante la intersección de las unidades temáticas, otro mapa de unidades "ecológicas" o ambientales. La superposición de las diferentes capas temáticas puede realizarse según dos modos de integración. Por un lado, la integración de los mapas temáticos puede llevarse a cabo por un experto o conjunto de ellos que, basándose en sus conocimientos y experiencia en la materia, deciden el grado de coincidencia entre los distintos compartimentos del ámbito cartografiado. Por otro lado, la superposición puede realizarse de una forma automática a partir de los denominados *Sistemas de Información Geográfica (SIG)* .

Los métodos cartográficos basados en la superposición ordenada de mapas temáticos por procedimientos informáticos (SIG), para obtener planos de unidades geográficas con información integrada, han alcanzado actualmente un inusitado desarrollo (Gutiérrez Puebla & Gould, 1994), pero aún así presentan serios problemas a la hora de satisfacer los requerimientos ecosistémicos que exige una planificación multidimensional e integrada del territorio como la planteada en este trabajo. A pesar de lo anterior, los SIG constituyen unas herramientas de gran utilidad y alcance en la gestión de los recursos naturales de un territorio ya que no solo sirven para superponer "capas" de información en el espacio y en el tiempo sino que, a través de un conjunto de programas de ordenador, permite el almacenamiento, recuperación, análisis y modelización de información espacial georreferenciada (Moreira & Fernandez-Palacios, 1995).

Como alternativa a estos métodos de corte análitico, y hasta cierto punto parciales de descripción del territorio, y en un intento de superar los problemas que conllevan, se han desarrollado otros procedimientos encaminados a la elaboración de verdaderos mapas ecológicos. Estos se basan en el reconocimiento y la plasmación cartográfica de los procesos biofísicos esenciales que determinan la expresión espacial, a diferentes escalas, de los ecosistemas (Fig. 4.1 b). A diferencia de los anteriores, bajo este procedimiento se intenta dar, desde el principio del mismo, un peso fundamental a todo el sistema de relaciones ecológicas que caracteriza al medio natural, más que a un conjunto de aspectos temáticos aislados. Desde tal punto de vista, las diferencias básicas existentes entre una u otra aproximación radican en que bajo la primera, al considerarse el medio natural como una superposición de compartimentos abióticos y bióticos, los procedimientos cartográficos traducen necesariamente un carácter analítico o reduccionista; mientras que desde la segunda, desde la que se entiende el medio natural como un sistema de relaciones biofísicas, dichos procedimientos poseen una naturaleza sistémica u holista. De cualquier forma, un Sistema de Información Geográfica entendido no sólo como una herramienta informática para el análisis de mapas, sino como un conjunto de modelos e informaciones definidas y establecidas con una filosofía y orientación sistémica, desde su origen, facilita extraordinariamente el análisis de flujos de relaciones biofísicas (Moreira *et al.*, 1996). Es así como se ha entendido el uso de Sistema de Información Ambiental de Andalucia (SinambA) en su aplicación al estudio y gestión del Gran Ecosistema Litoral de Doñana.

Derivado de la existencia de enfoques inductivos y deductivos en el proceso de clasificación de ecosistemas (apartado 4.1.) y, dentro de los procedimientos de cartografía sistémica, también podemos diferenciar entre: *cartografías ecológicas inductivas* y *cartografías ecológicas deductivas.*

La cartografía ecológica inductiva no parte de ninguna idea preconcebida de clasificación ni regionalización ecológica del territorio para, de esta forma, buscar una mayor objetividad en su descripción sintética (Fig. 4.1.b1). Mediante el empleo de técnicas estadísticas multivariantes, este procedimiento busca indicadores ecológico-cartográficos que permitan definir y reconocer en un mapa, las distintas escalas espaciales en que se manifiesta la heterogeneidad ecológica de un territorio (De Pablo & Matín de Agar, 1993). La utilización de este tipo de análisis estadístico permite la determinación conjunta de las características con mayor capacidad predictiva para elaborar una clasificación jerárquica de ecosistemas (leyenda del mapa), y que sirven a la vez para su referenciación cartográfica. En general las técnicas de clasificación se emplean para detectar patrones espaciales a diferentes escalas y las de ordenación para caracterizar los gradientes ecológicos dominantes en un territorio (De Pablo & Martín de Agar, *op.cit*.).

Frente a la gran ventaja de la objetividad en el procedimiento, ya que no dependen de los juicios de valor de las personas que la elaboran, el mayor inconveniente de la cartografía ecológica de tipo inductiva radica en la delimitación precisa, sobre las bases cartográficas, de las unidades ecológicas obtenidas, a diferentes escalas espaciales, por las técnicas multivariantes. La proyección espacial de los grupos de observaciones asociadas por los métodos de clasificación u ordenación no poseen límites naturales, ya que sus fronteras y perímetros son el reflejo de la forma y el tamaño de las unidades de muestreo seleccionadas. Tradicionalmente, estas solían ser obsrvaciones dentro de cuadrículas que formaban parte de una malla regular trazada sobre el territorio en estudio de tal forma que el procedimiento inductivo solía necesitar de una fase final de fotointerpretación y/o prospeciones de campo mediante la cual se ajustaban los límites artificiales de las cuadrículas u observaciones agrupadas matemáticamente con los límites naturales reales. No obstante, hoy en día, el uso de SIG vectoriales permite resolver este antiguo problema si se observa un cuidado exquisito en los límites comunes de las diferentes variables a contenplar.

Este tipo de cartografía sistémica presenta problemas para recoger la estructura ecológica de territorios extensos a escalas espaciales de detalle, como pueda ser el nivel de ecotopo, por el gran número de puntos de muestreo que se necesitarían. Asimismo, bajo este procedimiento cartográfico no suelen trabajar, al menos en todo el proceso, equipos multidisciplinares por lo que suelen generarse ciertos problemas de interpretación global de los resultados obtenidos por las técnicas multivariantes y de su correspondiente proyección espacial en los mapas.

A diferencia de los procedimientos de cartografía inductiva, la cartografía deductiva parte de un modelo conceptual que intenta describir, *a priori*, y de una forma objetiva y simplificada la compleja realidad ecológica de un territorio (Fig. 4.1.b2). Desde esta aproximación se arranca de un modelo de organización jeráquica de un Gran Ecosistema que incluye los límites administrativos del espacio considerado. Los componentes estructurales (compartimentos) y funcionales (procesos) de este Gran Ecosistema se organizan según una jerarquía de dominio de relaciones entre niveles jerárquicos y una jerarquía de escalas que delimitan la dimensión espacial y temporal con que se manifiestan. Posteriormente y basándose en ese modelo se lleva a cabo una jerarquización espacial del Gran Ecosistema en ecosistemas interdependientes de diferentes tamaños (..., ecodistrito, ..., ecotopo). El medio natural o Gran Ecosistema a estudiar queda ordenado de este modo en componentes priorizados en relación a las escalas espaciales bajo las que se expresan. Cada escala espacial requiere un determinado análisis y tratamiento de la información para poder delimitar unidades geográfico-funcionales homogéneas, es decir, ecosistemas.

Una de las consecuencias de la aplicación del modelo de organización jerárquica es la posibilidad de seleccionar, de entre las características del medio, aquellas que posean mayor valor predictivo para la elaboración de una clasificación jerárquica de tipos genético-funcionales de ecosistemas asociados a cada escala espacial considerada. Por añadidura, las categorías de esta clasificación constituyen la leyenda de los mapas. Acorde también con los postulados básicos del modelo jerárquico, la cartografía ecológica deductiva adopta como uno de sus fundamentos el reconocimiento y la interpretación de los aspectos fenosistémicos de los ecosistemas a través del análisis de imágenes de satélite y fotos aéreas junto con controles de campo. La interpretación conjunta de imágenes y fotogramas por parte de un equipo formado por especialistas de diferentes campos, permite reconocer y delimitar a distintas escalas y, de una forma muy eficaz, los patrones espaciales perceptibles del medio natural. Se parte de la idea de que el sistema de relaciones biofísicas de un espacio geográfico se expresa en forma de configuraciones repetitivas o patrones espaciales perceptibles que pueden reconocerse y cartografiarse. La delimitación de ecosistemas se basa, pues, en aquellas

características integradoras del medio que sean altamente perceptibles y, por tanto, fácilmente cartografiables.

Dado que la elaboración de las cartografías ecológicas deductivas se inician con la interpretación conjunta de imágenes por parte de un equipo transdisciplinar, se hace indispensable que dicho equipo esté formado por especialistas de diferentes campos de las ciencias de la naturaleza, y que éstos puedan integrar los suficientes conocimientos y experiencias como para reconocer y caracterizar la estructura ecológica del medio natural mediante el análisis de sus aspectos fenosistémicos durante todo el proceso.

Una vez orientado el equipo trabajo se inicia el procedimiento de elaboración cartográfica propiamente dicho. En él se establecen ciclos correctores repetitivos mediante los cuales se alternan las tareas de fotointerpretación y manejo de imágenes en gabinete, con el análisis sobre el terreno y los recorridos de campo en los que los propios fotogramas e imágenes se emplean como "mapas" a interpretar. A todas las escalas, pero especialmente a las de mayor detalle (ecotopo), es fundamental que en campo todos los especialistas hagan sus observaciones de una forma simultánea en el tiempo y sobre las mismas estaciones de muestreo (Zonneveld, 1990), habida cuenta de la estrecha relación y elevado dinamismo espacio-temporal entre las característas cartográficas seleccionadas.

Los polígonos o entidades con delimitación cartográfica se corresponden con los tipos de ecosistemas definidos en la clasificación jerárquica, siendo el resultado de la interpretación sintética, a diferentes escalas, de las características observables de los componentes estructurales de los ecosistemas (formas de modelado, red hidrográfica, suelos, vegetación, etc.). Mientras que la relativa homogeneidad de la estructura de la vegetación es una característica básica para la discriminación cartográfica de ecotopos (Runhaar & Udo de Haes, 1994), la fauna por su movilidad y por los rápidos desplazamientos que sufren en cortos períodos de tiempo, no se suele contemplarse como tal en la cartografía ecológica.

En términos generales los límites de los ecosistemas se establecen según criterios determinados en base al análisis de las discontinuidades o la densidad de interrelaciones entre los patrones espaciales del medio natural. En la mayoría de los casos, los ecosistemas se distinguen porque aparecen relativamente homogéneos cuando se los compara, a una determinada escala espacial, con sus alrededores. Son varios los principios básicos a considerar cuando delimitamos ecosistemas bajo la perspectiva de la clasificación jerárquica (Klijn & Udo de Haes, 1994).

- Conforme se baja en el nivel escalar de observación aumentan los detalles, las clases se hacen más pequeñas y el número de límites se incrementa.

- Los límites que han sido definidos a un cierto nivel permanecen intactos en niveles más detallados de la clasificación.

- La definición de los límites entre unidades a una escala puede revisarse de una forma más precisa a escalas más detalladas.

a) CARTOGRAFIA AMBIENTAL POR SUPERPOSICIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE COMPONENTES AISLADOS DEL MEDIO NATURAL.

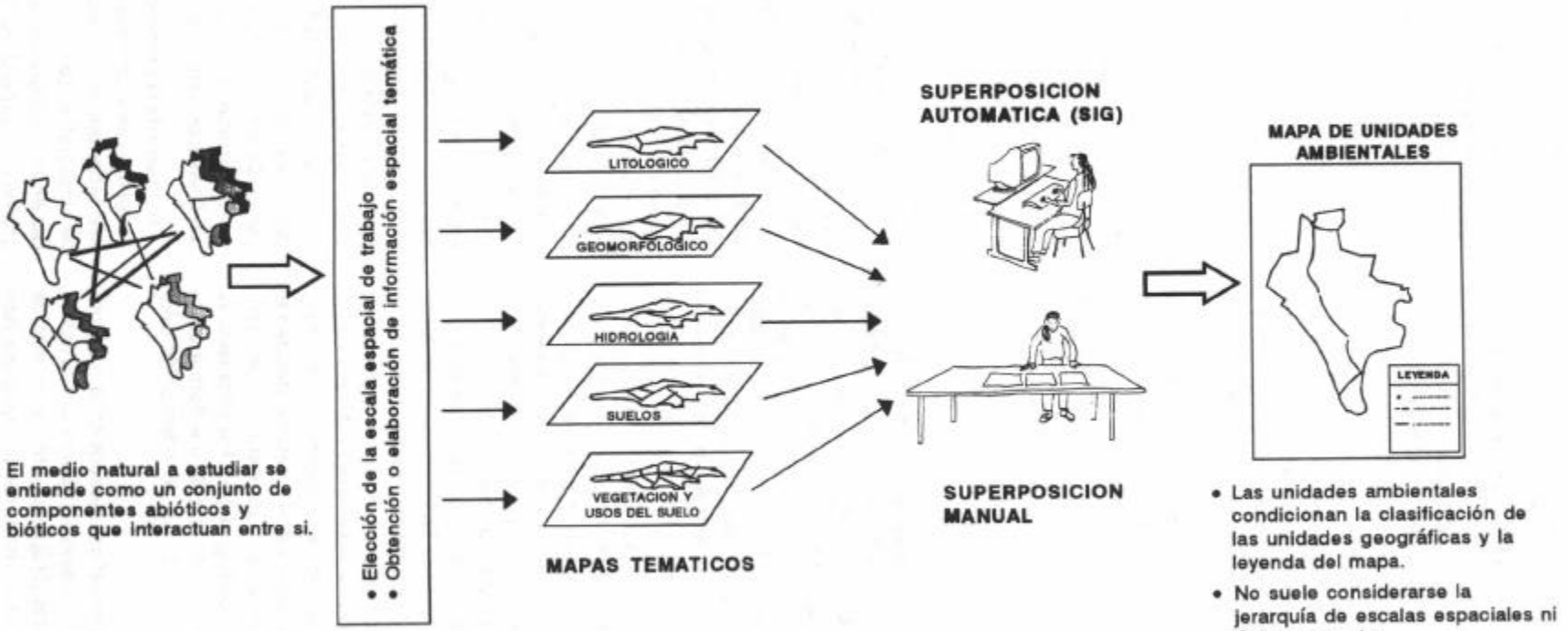

Figura 4.1. Diferentes aproximaciones y procedimientos metodológicos para la elaboración de cartografías ambientales (a) y ecológicas (b) del medio natural. El esquema utiliza como ejemplo el espacio administrativo del Parque Nacional de Doñana, pero desde una perspectiva ecosistémica sólo tiene sentido su análisis si esta superficie administrativa se refiere a un marco natural mucho más amplio como es el Gran Ecosistema Litoral de Doñana representado en el recuadro.

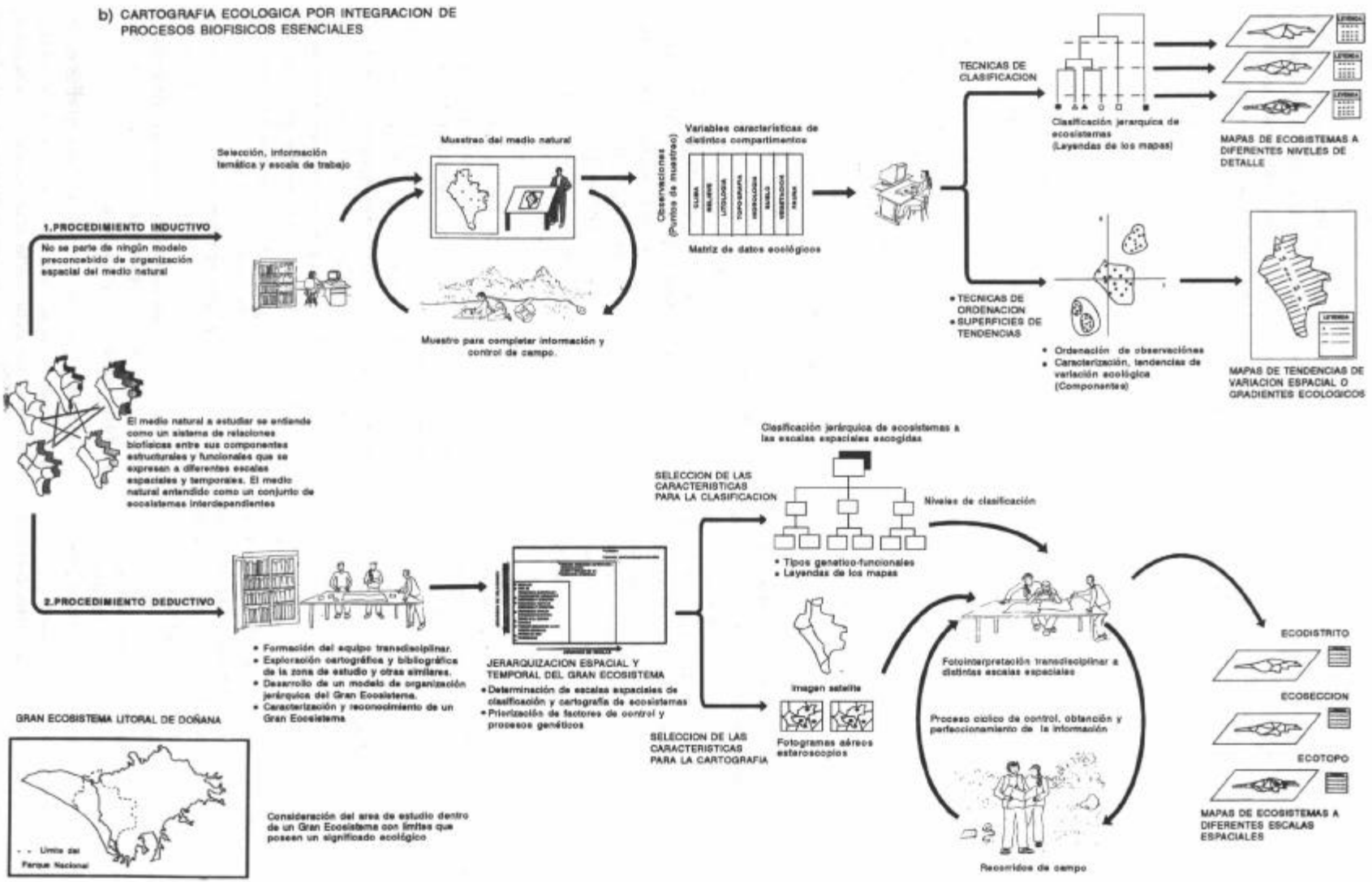

Figura 4.1. (Continuación) Diferentes aproximaciones y procedimientos metodológicos para la elaboración de cartografías ambientales (a) y ecológicas (b) del medio natural. El esquema utiliza como ejemplo el espacio administrativo del Parque Nacional de Doñana, pero desde una perspectiva ecosistémica solo tiene sentido su análisis si esta superficie administrativa se refiere a un marco natural mucho más amplio como es el Gran Ecosistema Litoral de Doñana representado en el recuadro.

Dentro de este contexto, Bailey (1996) discute lo inapropiado de utilizar la divisoria de aguas de las cuencas hidrográficas como los límites de los ecosistemas a escalas espaciales grandes por diferentes motivos. Por una parte, su delimitación constituye una tarea complicada, y en cierta medida subjetiva, al menos en regiones con un modelado tabular muy marcado. Por otro, la divisoria de aguas de los acuíferos no suelen coincidir con los límites de la red de drenaje superficial y ambos hidrosistemas forman parte del ciclo hidrológico cuyos flujos superficiales y subterráneos interrelacionan ecosistemas, por lo que viene a ser muy difícil dar prioridad en un mapa a una u otra divisoria. Resulta más apropiado considerar las cuencas de drenaje superficial y subterráneos como sistemas hidrológicos de referencia para completar el análisis ecosistémico de los sistemas ecológicos que contienen.

El mapa final obtenido por este procedimiento, es el resultado de una estrecha colaboración entre todos los miembros del equipo, en el que cada cual aporta su experiencia y los conocimientos de las disciplinas que representan. Pero el trabajo de integración realizado no es una suma de términos independientes (conocimientos y experiencias) es decir de carácter multidisciplinar, sino como ya se ha reiterado, transdisciplinar ya que al asumir los planteamientos de la aproximación ecosistémica, como herramienta de trabajo, se acepta su naturaleza sistémica (el ecosistema como concepto integrador) y deductiva (se parte del modelo de organización jerárquica y funcionamiento de los ecosistemas). De esta forma se crea un procedimiento de integración en el que las diferentes disciplinas implicadas en el estudio comparten el objeto de análisis, los objetivos finales y la metodología, en aras de una forma común de pensar y actuar sobre la organización, funcionamiento y dinámica del medio natural. Quizá de esta última circunstancia derive el mayor inconveniente que tiene este procedimiento de cartografía deductiva, esto es, el cierto grado de subjetividad que se introduce al depender estrechamente de la composición, nivel de conocimiento y experiencia de los miembros del equipo que la lleva a cabo. Pero sí se supera este problema, seleccionando cuidadosamente el equipo transdiciplinar en función de las preguntas básicas o aplicadas a responder, objetivos y usuarios de la información a generar, el método deductivo de clasificación y cartografía ecológica tiene la ventaja de poder elaborar mapas de ecosistemas a diferentes escalas con un bajo consumo de tiempo y esfuerzo. Bajo este enfoque, es posible generar documentos de gran utilidad en la planificación integrada y gestión multidimensional de recursos con una relación muy buena entre el esfuerzo-tiempo-dinero invertido y la utilidad a corto y largo plazo de los resultados obtenidos. En este sentido, la aproximación ecosistémica se presenta como una herramienta muy adecuada para generar, de una forma rápida y eficaz, información georrefenciada fácilmente interpretable y por tanto de gran utilidad para la gestión de ecosistemas en territorios con una elevada tasa de transformación, como puede ser el caso del área de Doñana.

Cualquiera de las aproximaciones a la cartografía ecológica que hemos comentado anteriormente buscan, aunque empleando diferentes procedimientos metodológicos, reconocer, caracterizar y delimitar patrones espaciales de un territorio. Se parte de la base de que las interrelaciones de dependencia entre los diferentes componentes del ecosistema condicionan su organización espacial, generándose estructuras características o pautas espaciales repetitivas (patrones) que pueden detectarse y servir para delimitar sectores ecológicamene homogéneos. Estos patrones o conjunto de caracteres recurrentes de organización espacial de los ecosistemas vienen condicionados por procesos que ligan espacialmente, a través de flujos de materia y energía, los distintos ecosistemas de un determinado nivel escalar.

Los intentos por tipificar estos patrones espaciales cuentan ya con varias décadas (González Bernáldez, 1981; Haber, 1990) y pueden explicarse, por regla general, en términos de los tipos de

interconexiones o transferencias de información que se establecen entre los diferentes ecosistemas. Para las escalas de la clasificación y cartografía seleccionadas (ecodistrito, ecosección, ecotopos, ecoelementos) nos interesan especialmente dos tipos de estructuras espaciales:

- *Estructura vectorial*. Se refiere a patrones espaciales en los que los ecosistemas se articulan alrededor de un gradiente unidireccional dominante. Los flujos unidireccionales de materia y energía vinculan a los ecosistemas afectados aunque se encuentren muy alejados entre sí. Las perturbaciones, que se generen en un determinado punto del gradiente, afectan a todos los ecosistemas localizados por debajo del espacio perturbado. En este modelo de proyección espacial dominan las conexiones horizontales entre ecosistemas según un flujo de arriba-abajo orientado alrededor de un gradiente ambiental predominante que generalmente viene determinado por las condiciones geomorfológicas a nivel de macro y mesoescala.

  En general, los procesos que generan patrones vectoriales en la disposición espacial de los ecosistemas están muy ligados a los modos dominantes de la circulación del agua superficial y subterránea. Como ejemplos se pueden citar la red drenaje de las cuencas hidrográficas que conectan vectorialmente sus cabeceras con las zonas medias y bajas o, a menor escala, las conexiones vectoriales entre las partes alta y baja de una ladera. También pueden incluirse los flujos de aguas subterránea, de diferente longitud, que conectan las zonas altas de recarga de un acuífero con las bajas de descarga (Fig. 3.10.)

- *Estructura celular*. Bajo este modelo, el territorio se muestra como un mosaico azonal de células o ecosistemas entre los que no se establecen direcciones o gradientes predominantes de transferencias de materia y energía. Las conexiones horizontales entre ecosistemas son de corto alcance y carácter discontinuo, e interrumpen gradientes ambientales incipientes de variación.

  Este tipo de modelo es característico de condiciones geomorfológicas a nivel de microescala, típico de modelados tabulares o plano en general en los que se favorece el desarrollo de transferencias geoquímicas bidireccionales, desde las partes altas de las microelevaciones hacia las bajas de las microdepresiones, conformando en último término un patrón espacial de tipo celular. También los procesos celulares, tanto los de origen natural o antrópico, pueden interrumpir los patrones de organización vectoriales y generar discontinuidades, incrementándose la heterogeneidad paisajística del medio natural al obtenerse estructuras por patrones espaciales sobreimpresos. Interpretados de este modo, los procesos responsables de la interconexión entre los ecosistemas, y por tanto condicionantes de sus patrones espaciales, operan de una forma simultánea a diferentes escalas espaciales y temporales (Martín de Agar *et al.,* 1995).

Junto a las dos estructuras anteriores también se ha definido una *estructura equipotencial* que se refiere a patrones que se expresan en grandes escalas espaciales en forma de extensas áreas o *zonas* equipotenciales, las cuales presentan una cierta homogeneidad en cuanto a sus características ecológicas. Estas zonas (climáticas, latitudinales, altitudinales, etc.) se corresponden con los niveles jerárquicos superiores de la clasificación de ecosistemas que no se consideran en este trabajo dado que la variabilidad ecológica del Gran Ecosistema Litoral de Doñana puede explicarse por factores de control y procesos genéticos que se expresan desde la escala inferior de ecodistrito.