

El tratamiento del territorio como sistema: criterios ecológicos y metodologías paramétricas de análisis

Joan MARULL¹ & Joan PINO²
& Enric TELLO³ & Josep M. MALLARACH⁴

¹ Barcelona Regional. Agencia metropolitana de desarrollo urbanístico y de infraestructuras ² & Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. UAB ³ & Departamento d'Història i Institucions Econòmiques. UB ⁴ & Consultor ambiental.

RESUMEN: Entendemos por *matriz territorial* la base espaciotemporal resultante del medio físico, el componente biológico, sus relaciones funcionales y las transformaciones que la actividad humana imprime en el sistema, expresada en formas concretas de paisaje. Por su parte, el *paisaje* se define desde una perspectiva histórica, como la expresión territorial del metabolismo que cualquier sociedad mantiene con los sistemas naturales que la sustentan. Un camino para entender los cambios en la configuración del territorio, consiste en analizar los flujos energéticos, materiales y de información que resultan del intercambio metabólico de la economía con su entorno ambiental, identificando los principales impactos ecológicos. Una parte del territorio está integrada por espacio urbanizado, en tanto que la mayor parte suele corresponder, todavía hoy, al concepto de espacio abierto. La conciliación de los intereses de cada uno de estos dos usos resulta de la mayor trascendencia en territorios con una fuerte presencia humana. Conduce esto a considerar la matriz territorial como un *sistema funcional*, un modelo emergente que aporta criterios ecológicos y metodologías paramétricas útiles en la evaluación ambiental estratégica de planes urbanísticos y de infraestructuras.

DESCRIPTORES: Modelos territoriales. Ecología. Planeamiento. Metodología ambiental.

I. LOS CRITERIOS ECOLÓGICOS

Ramón Margalef contribuyó a establecer el fundamento teórico para entender que la sostenibilidad del desarrollo es función directa de la complejidad, e inversa de la disipación de energía. En la biosfera, el aumento de la entropía está asociado a la adquisición de complejidad gracias al hecho de que los sistemas vivos aprovechan la radiación solar como si se tratase —en palabras de Margalef— de una especie de “libreta de ahorros termodinámica” que une al mero suministro de energía un mecanismo adicional “que la utiliza para aumentar la información, complicarse la vida y escribir la historia” (MARGALEF, 1991).

Recibido: 15.10.2007.

Cuando el aumento de energía disipada disminuye la complejidad del sistema, la degradación ambiental es un resultado palpable de la estrategia de malbaratamiento que ha sido denominada en ecología como el “principio de la Reina Roja” (en alusión al personaje de *Alicia en el país de las maravillas*): correr cada vez más para seguir en el mismo sitio. Margalef considera que la acumulación de información en unos puntos se sustenta en la explotación de otros espacios de menor complejidad y mayor producción. Pero esta relación de interdependencia puede establecerse de formas diversas. Un modelo espacialmente heterogéneo permite, por ejemplo, mantener unidos lugares más maduros y organizados

e-mail: jmarull@bcnregional.com; joan.pino@uab.es; tello@ub.edu.

con otros más simples y productivos, en una estructura reticulada capaz de garantizar la estabilidad del sistema. Los mosaicos agroforestales de los paisajes tradicionales mediterráneos son un buen exponente.

Fernando González Bernáldez, pionero de la ecología del paisaje en la Península Ibérica, consideraba que el mundo rural tradicional tiende a mantener un cierto equilibrio entre explotación y conservación, mediante diversos gradientes de intervención humana en la *matriz territorial* (GONZÁLEZ-BERNÁLDEZ, 1981), que definimos como la base espaciotemporal resultante del medio físico, el componente biológico, sus relaciones funcionales y las transformaciones que la actividad humana imprime en el sistema. En cambio, el proceso de explosión metropolitana (*urban sprawl*) es un modelo de conurbación dispersa que supone un ejemplo diametralmente opuesto, ya que sustenta su competitividad maximizando la entropía que se proyecta al entorno (TERRADAS, 2001). La estrategia de aumentar la complejidad, sin incrementar —o incluso disminuyendo— el sistema disipativo es la alternativa que se propone al actual modelo de desarrollo (RUEDA, 2002).

Esto sugiere la importancia de analizar el intercambio de energía, materia e información entre las sociedades humanas y los sistemas naturales que las sustentan, con el objetivo de identificar cuales son los mecanismos que asocian la disipación de energía con el incremento o deterioramiento de la *complejidad* de los sistemas ecológicos, entendida ésta como la capacidad para acoger especies y procesos y, en definitiva, con la calidad ambiental (FORMAN, 1995). Buena parte de la respuesta probablemente reside en el concepto de *eficiencia territorial*, que definimos como las formas de aprovechamiento económico de la matriz territorial que consiguen satisfacer mejor las necesidades humanas manteniendo, al mismo tiempo, el buen estado ecológico de sus paisajes.

Las metodologías para avanzar en esta dirección han de ser necesariamente transdisciplinares, y ya se encuentran disponibles en diversos campos, como los de la economía ecológica y la ecología del paisaje. La economía ecológica estudia la contabilidad de los flujos y balances biofísicos, así como la apropiación humana de los recursos naturales (huella ecológica). La

ecología del paisaje, por su parte, propone métricas para analizar la coherencia estructural y funcional de la matriz territorial. Entonces, el *paisaje* puede ser entendido desde una perspectiva histórica como la expresión territorial del metabolismo que la sociedad mantiene con los sistemas naturales que la sustentan (MARULL & *al.*, 2006), abriendo la puerta a una visión evolutiva —ecológica y económica— de los cambios funcionales producidos en la matriz territorial por la creciente capacidad transformadora del hombre, a una escala espaciotemporal sin precedentes históricos (ver FIG. 1).

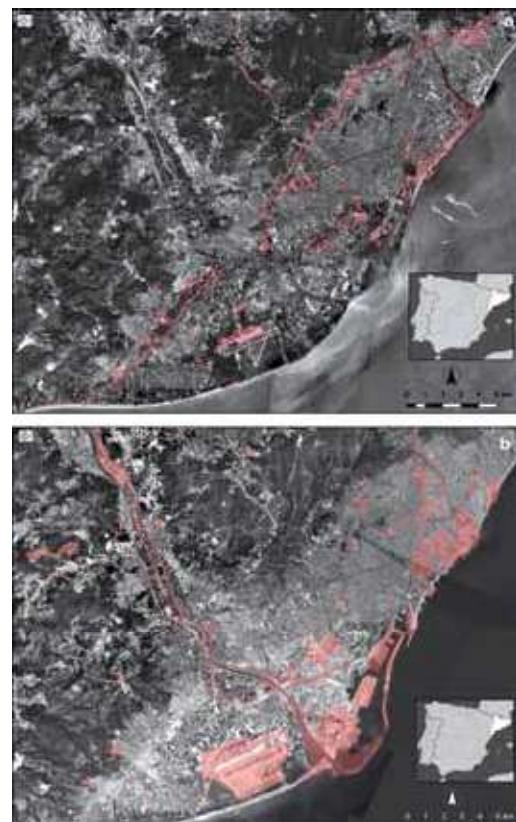


FIG. 1. Cambios en la matriz territorial del área metropolitana de Barcelona (sensor HRV del satélite SPOT). Se representan —en color— las principales transformaciones urbanísticas y de infraestructuras en el periodo preolímpico (1986-1992; a) y desde los Juegos Olímpicos hasta ahora (1992-2007; b). Se aprecia la creciente capacidad transformadora del hombre, a una escala espaciotemporal sin precedentes históricos

Fuente: Fotografías NASA-Johnson Space Center.

El enlace entre la economía ecológica y la ecología del paisaje se relaciona con el giro que están experimentando en el mundo las políticas ambientales. En este sentido, la Estrategia Mundial de la Conservación ya introdujo —en 1980— la idea de que la *conservación* implica el uso prudente y responsable de los recursos y de los servicios ambientales de todo el territorio, que no puede confundirse con una mera “preservación” de algunas unidades aisladas donde se limite o deje de haber intervención humana. Este enfoque de las políticas ambientales, obliga a incorporar como un objetivo central del planeamiento, el estado ecológico de la matriz territorial, entendida —según nuestro axioma de partida— como un *sistema funcional* (FOLCH, 2003).

2. LAS METODOLOGÍAS PARAMÉTRICAS

Si consideramos el territorio como un sistema complejo, podemos escoger un método ecosistémico para estudiarlo (MAY, 1989). De acuerdo con esta premisa, la matriz territorial —y el paisaje— serían sistemas organizados en niveles jerárquicos de complejidad que dependerían de su escala espaciotemporal. Para entender esta organización de la complejidad consideraremos necesaria una aproximación holística, que tenga en cuenta los principales factores que caracterizan el territorio globalmente, de una forma integrada. La aproximación sistemática empleada en la ecología del paisaje cuantitativa permite transferir las teorías actuales sobre la matriz biofísica en herramientas útiles para una planificación territorial sostenible. La formulación matemática asociada a ellas, si bien puede dificultar la comprensión de algunos conceptos, ayuda a formalizar y acotar características importantes e intuitivas del terreno. Aproximación conceptual y metodológica que confluyen en el tratamiento del territorio como sistema:

$$T = F(X) = \{V \text{ es abierto de } T, V \subset X\}$$

Donde X es la *matriz territorial*, es decir, la superficie total de terreno que se quiere estudiar. Consideramos T como una topología discreta: todo subconjunto (V) de X es abierto

—a flujos en el sistema— de T . La superficie así definida resulta continua y cuantificable. Por tanto, la expresión formal de X parte de la reunión de todos los puntos (p_i) en un ámbito de estudio determinado:

$$X = \bigcup_{i \in I} p_i$$

De este modo, se define un *espacio topológico* uniforme, estratificado y elegante que la expresión matemática ha querido destacar. Una vez definida formalmente la matriz territorial, el método paramétrico propuesto pretende interactuar para comprobar el efecto que diferentes planes transformadores o medidas correctoras pueden producir sobre el medio biofísico subyacente, mediante sucesivas iteraciones. Recordemos que la matriz territorial se ha definido, precisamente, como la base resultante de las interrelaciones entre la matriz biofísica y las transformaciones debidas a la actividad humana. En la percepción del planificador viene a ser el espacio que se propone modificar, para generar la matriz territorial de la siguiente transformación. A tal propósito, se consideran dos métricas complementarias:

- i) una valoración homogénea de la matriz territorial en base a una estructura de índices ecológicos, que confluye en el cálculo de la *aptitud territorial* de planes y programas (MARULL & *al.*, 2007);
- ii) una modelización de la conectividad ecológica entre elementos del paisaje, como análisis de la *funcionalidad territorial* de diversas alternativas o escenarios, lo que permite calcular los impactos acumulativos con ella relacionados (MARULL & MALLARACH, 2005).

Mediante la evaluación de la *aptitud territorial* se pretende determinar la idoneidad de una extensión del terreno determinada para un uso concreto. Inicialmente, esta herramienta fue desarrollada como un recurso técnico destinado a los planificadores, ya que les proporciona una visión sistemática del entorno a partir de una serie de factores espaciales independientes, que posteriormente sería necesario especificar. De acuerdo con estudios

recientes, el cálculo de la aptitud territorial es un análisis multicriterio dependiente del contexto y basado en criterios de expertos, que en última instancia son los que definen los factores más relevantes a tener en cuenta, sus valores óptimos y las diferentes ponderaciones que deben aplicarse en los algoritmos (STOMS & *al.*, 2002).

En este marco de trabajo, se propone una estructura jerárquica, modular y transparente de métricas con aplicación cartográfica, que constituye la base de un índice de aptitud del territorio (IAT) para la ordenación del espacio construido y la planificación de infraestructuras. La metodología permite obtener un valor global de aptitud para cada punto de la matriz territorial, determinar que factor ambiental pesa más en dicha valoración y conocer la expresión de los índices parciales, indicadores y parámetros que progresivamente configuran algoritmos de rango superior. Debido a que se incorporan las principales variables geológicas, hidrológicas, biogeográficas, estructurales y funcionales, los analistas disponen de información relevante para establecer directrices preventivas, correctoras o compensatorias en la planificación y la evaluación ambiental estratégicas, lo que permite evaluar y comparar diferentes escenarios, facilitando a su vez los procesos de participación ciudadana.

$$IAT = 1 + 5 \left(\frac{\log(\Delta + 1)}{\log K_\Delta} \right)$$

$$\Delta = \Delta_{IVT} \Delta_{IVPN} \Delta_{ICE}$$

Donde Δ es el valor de la aptitud de la matriz territorial (X), resultante de la aptitud del medio físico (Δ_{IVT}), el componente biológico (Δ_{IVPN}) y sus relaciones funcionales (Δ_{ICE}). $K_\Delta = \log 65$ es una constante que permite relativizar los valores posibles del índice a una distribución teórica normal.

La incorporación de la funcionalidad territorial en planes y programas ha producido resultados interesantes pero desiguales en el planeamiento y la normativa, tanto territorial como sectorial, sobretodo por la falta de un marco regulador que les diese coherencia y a la insuficiente coordinación administrativa (MALLARACH & *al.*, 2007). Por otra parte, aunque hay un

claro consenso científico al respecto, la ecología del paisaje ha encontrado serias dificultades para establecer una relación matemática razonablemente sólida entre los patrones espaciales y los procesos funcionales que tienen lugar en la matriz territorial, en parte debido a que la actividad humana establece sus propios esquemas topológicos en el territorio. En cualquier caso, desde una percepción funcional del paisaje (ver FIG. 2), la relación entre patrones y procesos se considera un axioma fundamental en ecología y actualmente es un objetivo prioritario de la investigación en este ámbito (TURNER, 2005).

En general, los sistemas complejos como los que nos ocupan se basan en redes constituidas por nodos y conexiones, que interactúan según bucles retroactivos en los que el efecto actúa sobre la causa y se convierte en parte de ésta, lo que acaba produciendo mecanismos de autorregulación que garantizan cierta homeostasis frente a las incertidumbres del medio. En los ecosistemas existe un compromiso entre regularidad y azar, lo que aporta la máxima complejidad aparente: hay pocos nodos muy conectados y muchos poco conectados, son las denominadas *redes libres de escala*. Margalef ya intuyó la utilidad de estas distribuciones potenciales de frecuencia, que pueden tener relación con el éxito en la captura de recursos y/o espacio y, en consecuencia, perdurar en el tiempo (MARGALEF, 1977). La matriz territorial se comporta como una red para muchas de sus propiedades funcionales, entre las que destaca la *conectividad* por su papel en la conservación de especies y procesos (CHETKIEWICZ & *al.*, 2006). El índice de conectividad ecológica (ICE) es una medida de las interacciones entre los procesos ecológicos básicos —a múltiples escalas— que tienen lugar en el territorio:

$$ICE = \sum_{m=1}^{m=n} \frac{ICE_b}{m}$$

Donde m es el número de clases de *áreas ecológicas funcionales* (AEF) consideradas.

Entendemos dicha *funcionalidad* como la capacidad de configurar áreas focales para la conectividad, a nivel de matriz territorial (X). En territorios fragmentados por barreras antropogénicas, su identificación —en base a propiedades intrínsecas y contextuales—

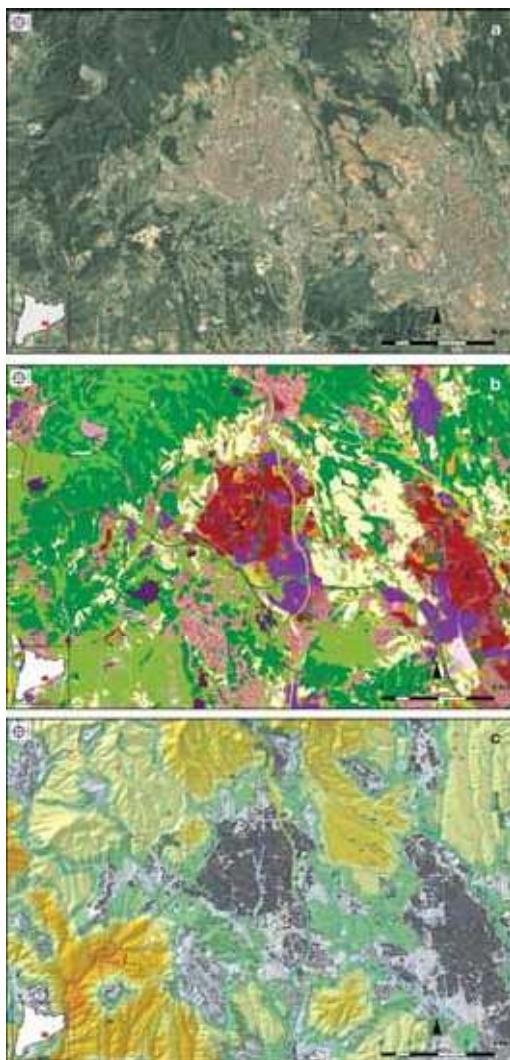


FIG. 2. Representación de tres concepciones complementarias de la matriz territorial:
 a) La percibida incorpora los aspectos estéticos y visuales del paisaje. b) La estructural considera el territorio formado por diversos elementos. c) La funcional tiene en cuenta no solo la existencia de estos elementos, sino también las relaciones y los flujos entre ellos (se muestra el índice de conectividad ecológica). Entorno de Terrassa y Sabadell, en el área metropolitana de Barcelona

Fuente: Elaboración propia.

puede tener un valor muy relevante, independientemente de su nivel de conectividad:

$$ICE_b = 10 - 9 \left(\frac{\ln(1 + x_i)}{\ln(1 + x_t)} \right)^3$$

Donde x_t es el valor máximo teórico del modelo de distancia de costes, calculado por clase de área ecológica funcional. Se utiliza la representación nodo/conexión, donde el centro de cada celda (p_i) se considera un *nodo* conectado a las celdas adyacentes. De esta manera, cada *conexión* tiene una impedancia asociada que se deriva de los costos de cada celda y de la dirección del movimiento. La matriz de impedancia (X_I) que requiere el modelo se calcula a partir de una matriz de afinidad respecto a los usos del suelo (X_A) y la afectación de las barreras antropogénicas en el espacio circundante (X_B).

Las dos décadas posteriores a la irrupción de la ecología del paisaje cuantitativa en Europa (NAVEH & LIEBERMAN, 1984) han presenciado desarrollos sin precedentes, en la teoría y la práctica, que han llevado el análisis espacial y la modelización territorial al frente de la investigación ecológica (WU & HOBBS, 2002). La aplicación de estas metodologías, a diferentes escalas de trabajo, han demostrado su interacción, tanto conceptual como técnica, con planificadores y responsables políticos (MALLARACH & MARULL, 2006). No obstante, es necesario conocer las limitaciones de los índices territoriales en la evaluación ambiental estratégica de planes y programas (OPDAM & *al.*, 2001). Para ser de utilidad, los algoritmos han de ser tan válidos como exactos en la escala en la que se toman las decisiones. Por otra parte, su fiabilidad depende tanto del algoritmo de cálculo empleado como de los parámetros que lo integran (ANDREARSEN & *al.*, 2001). También es importante remarcar que solo se aborda un aspecto de la evaluación ambiental: su impacto desde el punto de vista de la *sostenibilidad territorial*. Finalmente, la mayor parte de los impactos asociados al consumo de recursos, energía o las emisiones, son exportados fuera del territorio y deben de ser evaluados mediante otros métodos, como por ejemplo la huella ecológica (REES & WACKERNAGEL, 1996).

3. EL MODELO SISTÉMICO

El modelo socioeconómico actual es responsable del gran crecimiento urbanístico producido en los últimos cincuenta años en la mayor parte de las áreas metropolitanas y, también, de la crisis coetánea del sistema

agroforestal tradicional. Ambos procesos han originado una importante devaluación conceptual del territorio entendido como patrimonio colectivo —coherente con la aproximación sistémica— que, en la práctica, ha pasado a ser considerado poca cosa más que un “solar disponible” para sus propietarios. Esta desconsideración gradual del valor de la matriz territorial implica una despreocupación general en su gestión, incipientemente recuperada en algunos lugares. Una parte del territorio tiene asignados usos del suelo definidos (áreas urbanas, espacios naturales protegidos, etc.), mientras que el resto está constituido por “suelo expectante”, es decir, sin una definición clara en términos de ordenación territorial y, en consecuencia, más o menos paraurbanizado y a menudo degradado ambientalmente. Hecho que explica la percepción, especialmente en áreas metropolitanas, de un paisaje casi banal, intensamente antropizado (ACEBILLO & FOLCH, 2000).

En el pasado, las sociedades humanas organizaban los usos del suelo en gradientes de intensidad, pero siempre de forma integrada, porque de ello dependía su propia subsistencia. Las poblaciones no sólo vivían en un territorio, sino *del* territorio que habitaban. En una economía de base orgánica, dependiente de la fotosíntesis para obtener cualquier producto, contra mayor era la densidad de población más importante resultaba gestionar el territorio eficazmente. La explotación a gran escala de los combustibles fósiles superó la antigua dependencia energética local. Algunos estudios contribuyen al análisis de los cambios ocurridos en la matriz territorial en relación a las fuerzas motoras socioeconómicas y a la pérdida de su funcionalidad ecológica (TELLO & *al.*, 2006). Aclarar este punto resulta indispensable porque la degradación ambiental que ha comportado abandonar el uso integrado del territorio, urge a plantearnos recuperar la *eficiencia territorial* en un contexto social, económico y ambiental muy diferente.

La mayor parte de regiones históricas en el mundo, con bajo crecimiento de población y períodos económicamente aceptables, supieron diseñar convenientemente el paisaje (MCHARG, 1969). Cuando la sociedad rural se tuvo que articular con una sociedad urbana

incipiente, se produjo una leve estructuración del territorio de relativamente fácil correspondencia con un modelo sostenible. En el caso de la expansión urbana actual, a una escala sin precedentes históricos, su difícil integración territorial podría verse favorecida por las nuevas tecnologías (saneamiento, información, etc.). Se dispone, en efecto, de instrumentos y técnicas adecuados para saber como se debe actuar y en que partes del territorio es posible asumir según que riesgos. No obstante, la cuestión esencial es que la adopción de dichas técnicas y métodos para la gestión de los condicionantes ambientales es condición necesaria pero en modo alguno suficiente. Se requiere, también, un cambio conceptual, un paradigma nuevo de sociedad urbana integrada en un entorno rural.

Esta importante corriente de pensamiento sugiere hacer un esfuerzo sistemático hacia un modelo emergente de territorio, la estrategia del cual se fundamenta en potenciar el aumento de la complejidad disminuyendo el sistema disipativo, siempre que sea posible; argumentando que no hay solución al sistema metropolitano sin una articulación integral del espacio urbano en la matriz territorial de la que forma parte. Se trata de un modelo teórico, respaldado por la mayoría de urbanistas de la sostenibilidad (PESCI, 1999), que pretende descentralizar las grandes aglomeraciones urbanas para recobrar la escala humana de los barrios, potenciando su complejidad interna y disminuyendo el consumo de energía, principalmente la destinada al transporte. El modelo propone una gran *región urbana*, entendida como una fragmentación de la megápolis, mediante un proceso casi fractal que resulta en múltiples ciudades intermedias, compactas, complejas, integradas en su entorno rural histórico. De este modo, se pretende conseguir competitividad económica, calidad de vida en las ciudades y funcionalidad territorial, garantizando un buen estado ambiental. Se evita, por tanto, la urbanización difusa, posibilitando el aprovechamiento de las energías renovables sin la presión de vaciado funcional del territorio provocado por las megápolis actuales.

La ecología del paisaje ha puesto en evidencia la necesidad de gestionar el espacio y los recursos de una forma integral, para

mantener los procesos ecológicos y garantizar los balances del metabolismo social (PINO & RODÀ, 1999). No obstante, la ordenación de los espacios abiertos ha pasado por sucesivas etapas en las que se han considerado diversos elementos del paisaje. La definición de un sistema de espacios naturales aislados representó un primer estadio que pretendía proteger determinadas especies y hábitats. Posteriormente, se propuso la interconexión entre estos espacios para mantener los procesos ecológicos en un medio cada vez más antropizado, y esto condujo a considerar elementos conectores de flujos de energía e información, mediante una *red* ecológica de espacios protegidos. Pero ¿son suficientes estos elementos para asegurar el funcionamiento ecológico del territorio? Es evidente que se requiere un tercer elemento cada vez más dominante en el paisaje: la *matriz*, más o menos antropizada, de espacios abiertos no protegidos. Considerar la matriz de espacios abiertos, juntamente con una red de espacios protegidos, es un paso necesario y un reto importante, porque implica la incorporación de criterios de sostenibilidad en todas las políticas sectoriales. En efecto, como nunca antes la matriz territorial se vertebraba a partir de la ciudad. Este hecho instaura una importante tensión entre espacio abierto y espacio urbano, que se puede simplificar en la conocida —y anacrónica— dicotomía entre campo y ciudad.

Desde una concepción funcional del territorio, se analizan las implicaciones a diversas escalas del modelo de *mosaico territorial* (tesela, corredor, matriz) desarrollado por la ecología del paisaje (ver FIG. 3). Se parte de los principios teóricos propuestos por Richard Forman que, una vez adaptados a un ámbito ecopaisajístico mediterráneo, pueden aportar criterios de utilidad en la ordenación de los espacios abiertos (FORMAN & GORDON, 1986). El paisaje es, en efecto, un elemento destacado de nuestra dimensión perceptiva. En un contexto evolutivo, dinámico e histórico, representa una amalgama entre naturaleza, cultura y sociedad. La cuenca mediterránea es un mosaico de paisajes antropogénicos de muchos siglos de antigüedad, que albergan uno de los principales *hot spots* de biodiversidad del planeta. La conservación de dicha biodiversidad, un objetivo que han asumido legalmente todos los estados

europeos, no podrá conseguirse sin una adecuada integración de los asentamientos humanos en la *estructura funcional* del paisaje.

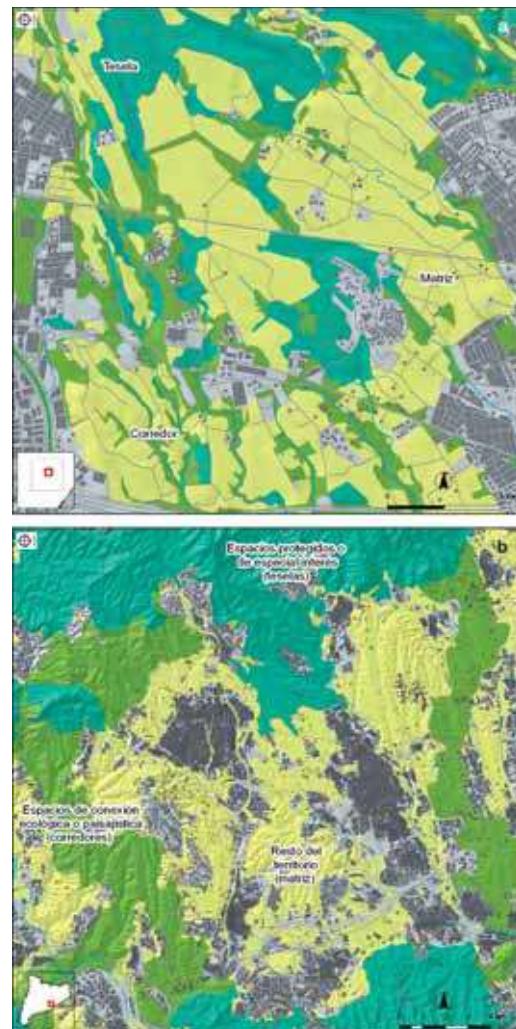


FIG. 3. El modelo de *mosaico territorial* (**tesela, corredor, matriz**) se puede representar a escala de paisaje (a), donde los elementos se corresponden a clases de usos del suelo; y a escala regional (b), donde los elementos propuestos son áreas con diversas funciones en relación a la conservación. Se muestra una zona entre Terrassa y Sabadell

Fuente: Elaboración propia.

El reto consiste, por tanto, en disponer de conceptos y herramientas de ordenación del territorio que nos permitan hacer compatible el necesario desarrollo urbanístico y de infraestructuras que requiere el país, con la

preservación de los procesos ecológicos básicos y el mantenimiento de una aceptable calidad paisajística y ambiental. Para abordar este trascendental problema de la sociedad contemporánea, se realiza una aproximación matemática al modelo de mosaico territorial y se propone su aplicación —como metodología de soporte— en los procesos de planeamiento territorial y de evaluación ambiental estratégica. En definitiva, lo que modestamente se pretende es contribuir a cambiar los enfoques en política de conservación y gestión del territorio, introduciendo la idea de que se requiere no sólo “proteger” espacios aislados, sino preservar el territorio como sistema, de una forma integral. Y esto quiere decir, fundamentalmente, que es necesario introducir el concepto de *matriz territorial* como una premisa básica en los procesos de planificación urbanística y territorial.

4. LA APLICACIÓN DEL MODELO

Un modelo conceptual se considera más robusto cuando sobrevive al contrastarlo repetidas veces con la realidad. Para poner a prueba la aplicabilidad de las nuevas *metodologías paramétricas* empleadas en desplegar el modelo de *mosaico territorial*, se han realizado diversas aplicaciones en casos concretos de estudio, elaborados a diferentes escalas de trabajo, principalmente en el ámbito metropolitano de Barcelona (MALLARACH & MARULL, 2006), pero también a nivel provincial, nacional e internacional (DAZZINI, 2007). Se ha verificado la utilidad del método a nivel de diagnosis ambiental, como soporte de planes sectoriales y parciales, en el análisis de la aptitud de planes urbanísticos y de infraestructuras y, también, sus relaciones con la evaluación de proyectos y obras. Finalmente, se han establecido unas directrices generales de aplicación. A continuación se exponen tres estudios realizados a diferentes escalas y tipologías de planeamiento.

Para mostrar de qué forma trabaja el método se presenta una propuesta de ordenación de los espacios abiertos para la región metropolitana de Barcelona (ver FIG. 4). Se parte de un modelo clásico de mosaico territorial desarrollado por Forman a nivel de directrices estratégicas (FORMAN, 2004), las

cuales se aplican mediante el soporte de las nuevas metodologías paramétricas (IAT) elaboradas a escala de planeamiento territorial (MARULL, 2005), posteriormente verificadas mediante estudio de campo. Resultan dos niveles básicos de ordenación de los espacios abiertos (*red* de espacios protegidos, *matriz* de espacios abiertos) que se clasifican según un orden jerárquico de protección (especial, territorial, preventiva) en seis subniveles: E1) espacios protegidos; E2) espacios conectores principales y de refuerzo de áreas protegidas; E3) espacios conectores secundarios y de especial interés ecológico; E4) corredores ecológicos (espacio fluvial de especial interés conector); E5) espacios estructuradores del territorio (separación urbana, parques agrarios); E6) espacios amortiguadores de la presión antrópica (enclaves verdes, paisaje agrícola).

Los análisis estadísticos realizados indican, de forma sumaria, que el esquema metodológico tiene cierto efecto homeostático en el índice de aptitud territorial (IAT), lo que permite un margen de error aceptable en cuanto a los criterios y parámetros utilizados en la propuesta de ordenación de los espacios abiertos (MARULL & *al.*, 2007). Por otra parte, mediante el índice de conectividad ecológica (ICE) se ha comprobado la importancia de la *matriz* (E4 a E6) en el funcionamiento ecológico del territorio, respecto a criterios clásicos de protección de espacios discretos, incluso cuando estos están conectados en *red* (E1 a E3). En consecuencia, los resultados corroboran —de forma cuantitativa— la idea de que es necesario integrar los asentamientos humanos en la estructura funcional del paisaje, reto que requiere un nuevo modelo conceptual, herramientas de análisis apropiadas, un enfoque transdisciplinar, además de capacidad y habilidad políticas para revertir las tendencias territoriales insostenibles dominantes.

En efecto, a medida que añadimos elementos en la propuesta de ordenación de los espacios abiertos, se observa un aumento en los valores del ICE y en el número y área total de las AEF, respecto al escenario tendencial (ejecución completa de los planes urbanísticos vigentes), tanto para el conjunto de los ecosistemas como para los forestales o agrícolas por separado (ver FIG. 5). El resultado es esperable, ya que el aumento de

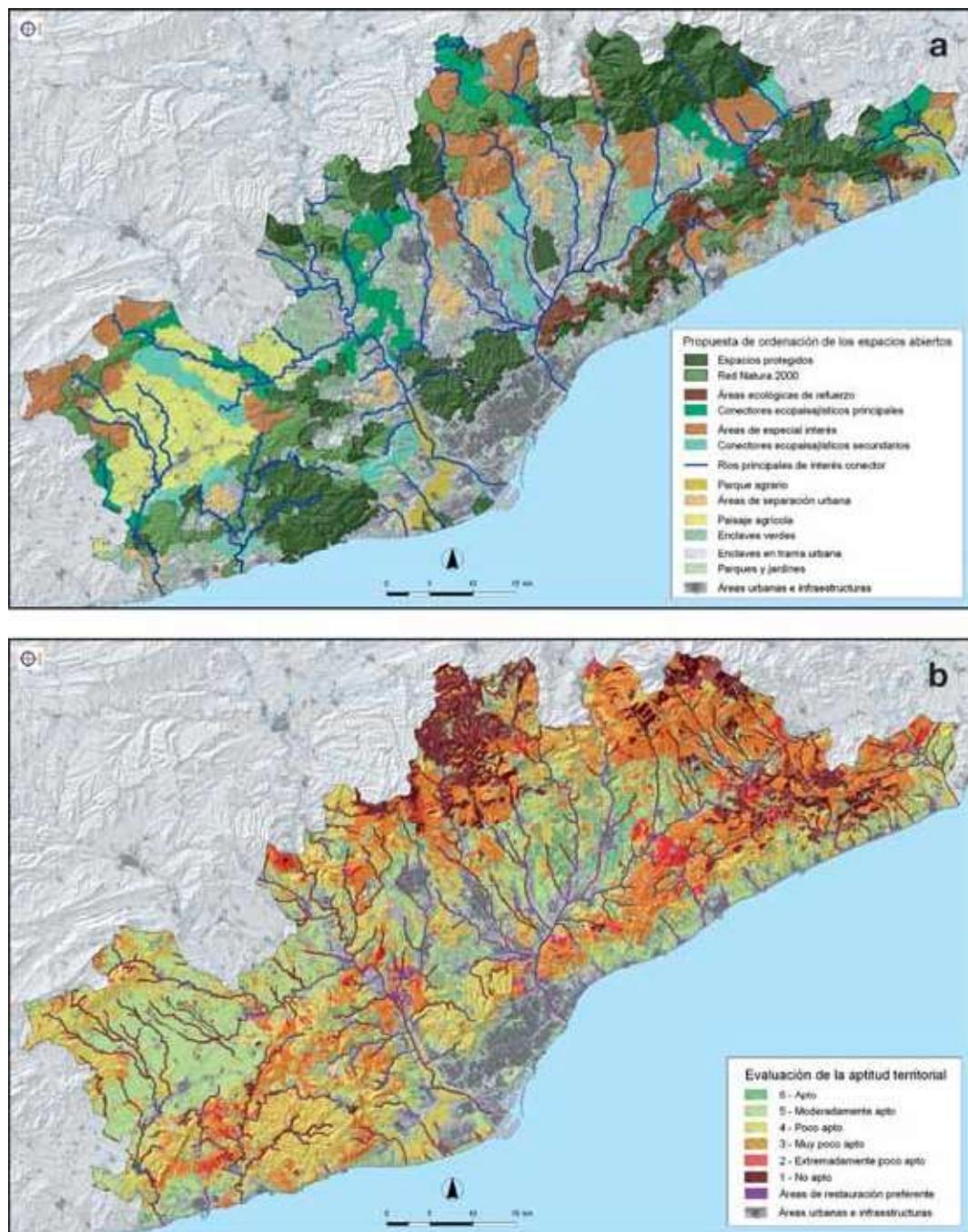


FIG. 4. Estudio de base para la ordenación de los espacios abiertos en la región metropolitana de Barcelona. (a) Se ha elaborado a partir de un modelo de mosaico territorial, desarrollado mediante la aplicación de nuevas *metodologías paramétricas* que han llevado a la obtención de un índice de aptitud territorial (b) y trabajos de campo complementarios

Fuente: Elaboración propia.

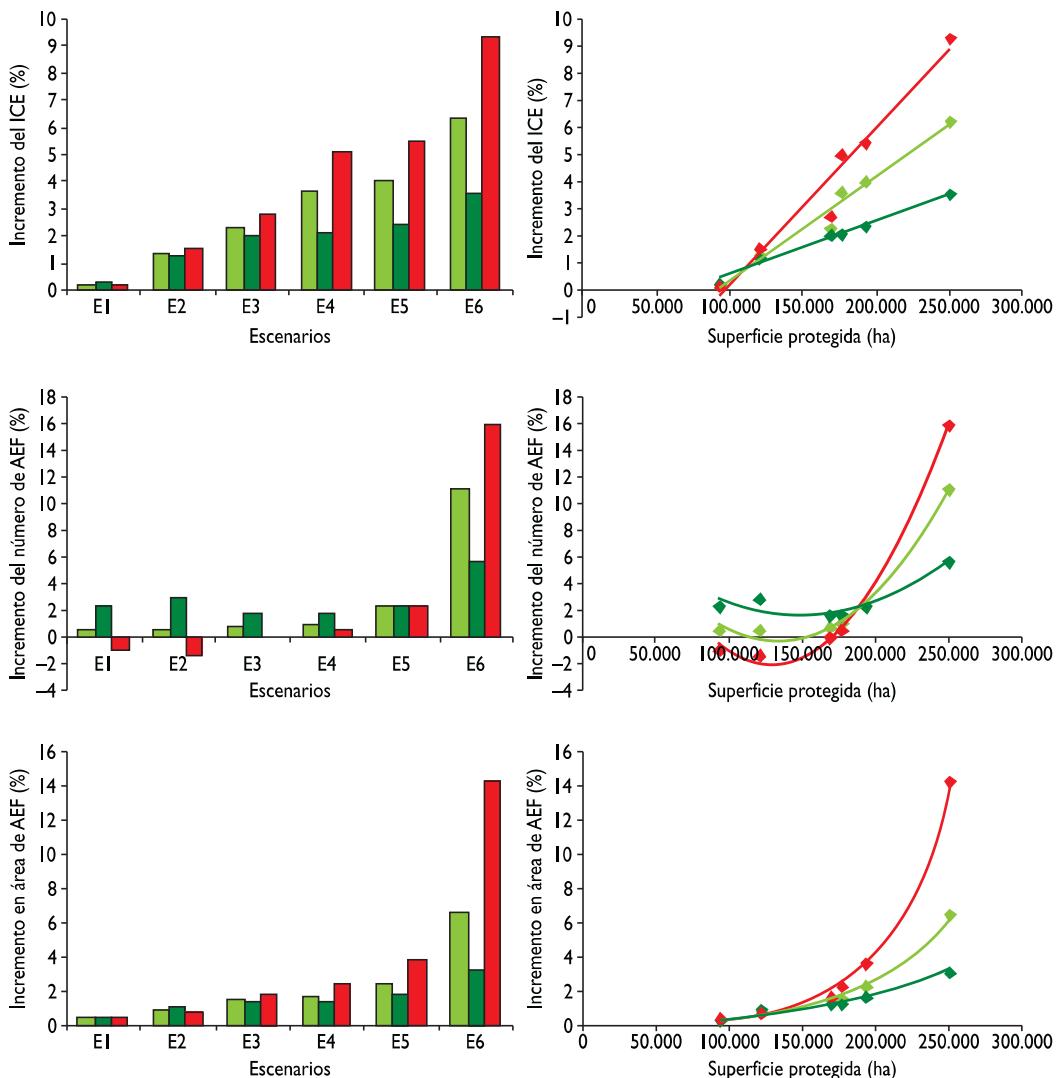


FIG. 5. Incrementos de la conectividad ecológica (ICE) (arriba), número de áreas ecológicas funcionales (AEF) (centro) y área total de AEF (abajo), respecto al escenario tendencial (planes urbanísticos vigentes) a la región metropolitana de Barcelona, para los diversos escenarios progresivos (E1 a E6; explicación en el texto) de la propuesta de ordenación de los espacios abiertos. Se muestran los incrementos brutos (izquierda) y ponderados por la superficie “protegida” a cada escenario (derecha). Los cálculos se presentan por AEF totales (rojo), forestales (verde oscuro) y agrícolas (verde claro)

Fuente: Elaboración propia.

elementos considerados implica un incremento de superficie protegida. No lo es, sin embargo, que el aumento de los valores no sea proporcional (una vez excluido el efecto de la superficie protegida). En síntesis: la incorporación de la *matriz* de espacios abiertos mejora ostensiblemente la conservación y potenciación de la conectividad ecológica, así como también la

preservación de grandes piezas de hábitat susceptibles de acoger especies y procesos, en oposición a la dinámica de fragmentación del territorio metropolitano. Por lo tanto, la consideración de medidas de preservación de la *matriz* de espacios abiertos (E4-E6) tiene un beneficio —en términos de protección por hectárea— considerablemente superior al de incrementar la *red* de espacios protegidos.

Hay diversas razones que explican y en parte justifican estos resultados. Tal vez la más destacable es que en un principio era necesario asegurar la conservación de los grandes macizos de la región metropolitana de Barcelona, áreas “naturales” en medio de un territorio altamente antropizado, con valores biológicos y geológicos notables. Pero esto en modo alguno justifica la escasa consideración que actualmente se tiene por la matriz de espacios abiertos no protegidos en los valles, que son los que precisamente

reciben una mayor presión urbanística, de equipamientos e infraestructuras de todo tipo, así como la intensificación agrícola y el abandono de las actividades agrarias tradicionales. En este sentido, diversos estudios han demostrado el interés ecológico de los mosaicos agroforestales, especialmente en áreas metropolitanas (SANTOS & *al.*, 2007).

Es importante destacar que las metodologías paramétricas se han desarrollado desde un punto de vista “posibilista”, es decir, para ser utilizadas como

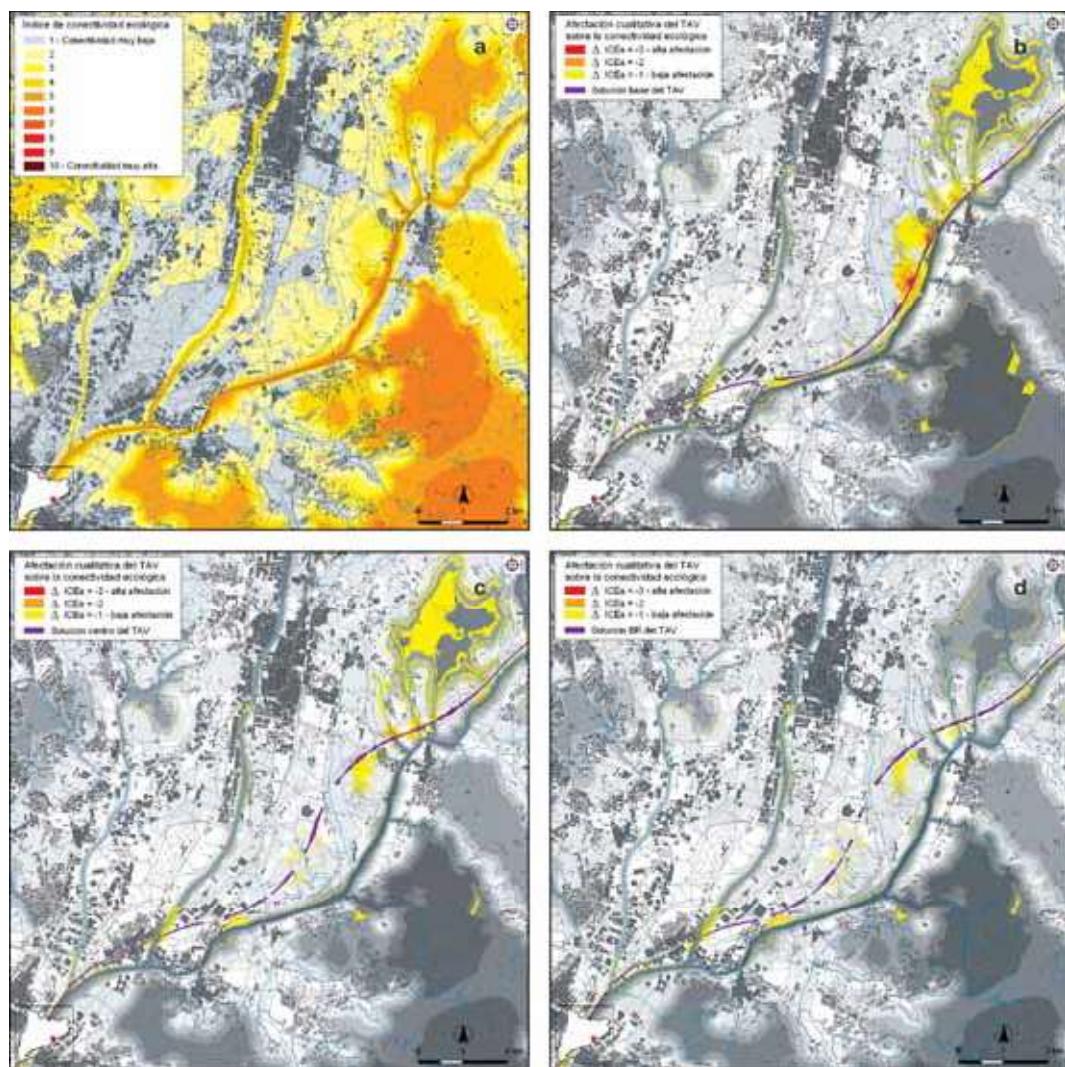


FIG. 6. Efecto potencial sobre la conectividad ecológica de trazados del tren de alta velocidad (TAV) en el tramo entre Mollet del Vallès y La Roca del Vallès. Se representa el índice de conectividad ecológica (ICE) en el escenario actual (a), así como los impactos producidos por la solución base (b), la solución centro (c) y la solución BR (d). Explicación en el texto

Fuente: Elaboración propia.

herramientas útiles en la ordenación del territorio. En este sentido, una evaluación del impacto potencial del conjunto de planes urbanísticos vigentes en la región metropolitana de Barcelona, ha permitido identificar los sectores urbanizables especialmente problemáticos en relación a los componentes físico, biológico también las áreas más aptas (IAT) para establecer asentamientos urbanos, según la propuesta de ordenación de los espacios abiertos. El análisis ha constatado que cierta proporción de sectores urbanizables se encuentra en suelos muy poco o nada aptos para este uso, algunos de ellos con graves implicaciones en el funcionamiento global del territorio. Por otro lado, se identifica una superficie mayor de suelos aptos, con planeamiento sin ejecutar o sin planeamiento, incluso vinculados a la red ferroviaria actual o prevista

También se ha considerado interesante

presentar otros dos casos concretos de estudio, esta vez a escala supramunicipal y local. A escala supramunicipal, un análisis de la afectación territorial de diversos trazados del tren de alta velocidad (TAV) propuestos en el Vallès Oriental (ver FIG. 6), demostró que el trazado acordado entre el ministerio y las administraciones locales (*solución centro*) tenía un impacto sobre la funcionalidad territorial sensiblemente menor que el del estudio informativo inicial (*solución base*), pero que todavía producía excesivos impactos irreversibles. Una nueva propuesta de trazado (*solución BR*), desarrollada según modelos verificados con estudio de campo, permitía reducir estos impactos considerablemente, en un territorio tan fragmentado por sistemas urbanos e infraestructuras como es el Vallès. En definitiva, el método (ICE) se considera muy sensible a la incorporación de medidas

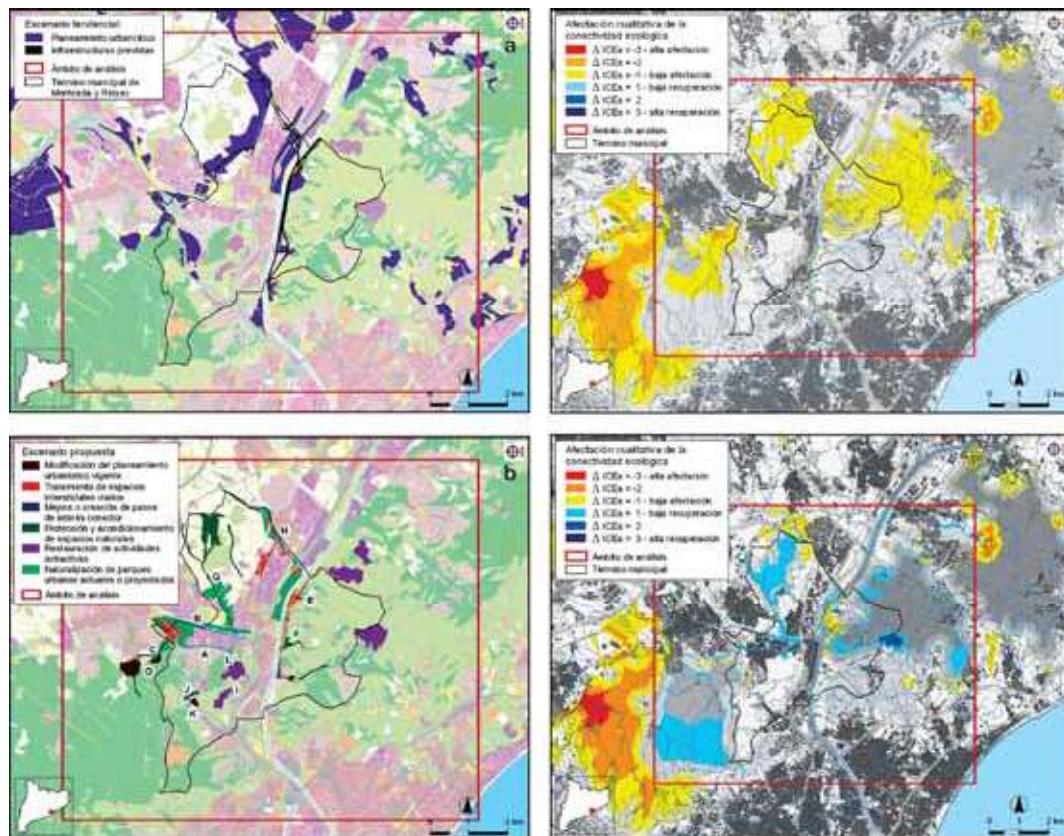


FIG. 7. Evaluación cuantitativa de la conectividad ecológica: a) escenario tendencial (planes urbanísticos y de infraestructuras); b) escenario propuesta (incluye el escenario tendencial). A la derecha se presentan los resultados respectivos (en relación al escenario actual)

Fuente: Elaboración propia.

proyectuales y constructivas, facilitando la comunicación con planificadores e ingenieros.

Finalmente, a escala local, se presenta una propuesta de restauración ecológica en el municipio de MONTCADA I REIXAC (ver FIG. 7), lugar estratégico por su situación geográfica en la depresión generada por la confluencia de los ríos Ripoll y Besòs, que a lo largo de miles de años se abrieron paso a través de la sierra Litoral. El hombre ha aprovechado históricamente estos pasos para emplazar todo tipo de asentamientos urbanos y vías de comunicación. Sin embargo, la implantación territorial de la mayoría de estas necesidades antrópicas no se ha realizado siempre de forma adecuada y a menudo ha deteriorado notablemente la calidad ecológica del territorio. El trabajo propone una serie de medidas de restauración ecológica, sin limitar el desarrollo urbano y de infraestructuras. La apuesta del municipio es generosa ya que plantea mejoras a escala local con fuertes repercusiones a escala regional, garantizando un legado para el futuro. La metodología utilizada (ICE) ha permitido modelizar el impacto ambiental de diferentes actuaciones diseñadas a nivel de proyecto, sobre la estructura del paisaje y el funcionamiento global del territorio, incorporando los efectos acumulativos de diferentes alternativas. No obstante, para escalas de detalle, como puede ser la planificación urbanística municipal, el método es complementario, que no excluyente, respecto a los métodos empíricos tradicionales.

5. CONCLUSIONES

No hay nada más difícil que demostrar una obviedad: ¿es el territorio un sistema? Los axiomas son indemostrables por definición. Sólo pueden ser desacreditados por los hechos, pero al inicio del razonamiento no se demuestran, sino que simplemente son admitidos como punto de partida. Obviamente, el territorio es un sistema. Un *sistema* es un conjunto de elementos relacionados de forma que constituyen una estructura funcional con propiedades emergentes, inexplicables por la simple aposición de las características inherentes a sus partes. Conduce esto a considerar la matriz territorial como un sistema complejo adaptativo, constituido por

el medio físico, el componente biológico, sus relaciones funcionales y las transformaciones antrópicas, expresadas en formas concretas de paisaje. Entonces, en base a nuestro axioma de partida, para comprender de qué manera la intervención humana modifica la configuración del territorio, se pueden analizar los flujos energéticos, materiales y de información que resultan del intercambio metabólico de la economía con su entorno ambiental, identificando los impactos ecológicos que se imprimen en el sistema.

Resulta necesario, en consecuencia, proyectar el territorio en base a un modelo sistemático, lo que requiere criterios ecológicos y herramientas matemáticas de análisis, que resulten útiles en el planeamiento territorial y la evaluación ambiental estratégica de planes urbanísticos y de infraestructuras. En este contexto, se han desarrollado metodologías paramétricas de soporte a la decisión a partir de sistemas de información geográfica, sobre todo vinculadas a temas ambientales complejos, para la interacción con usuarios expertos o como instrumentos de participación ciudadana. Se consideran dos métricas complementarias: i) una valoración homogénea de la matriz territorial en base a una estructura de índices ecológicos, que confluye en el cálculo de la *aptitud territorial* de planes y programas; ii) una modelización de la conectividad ecológica entre elementos del paisaje, como análisis de la *funcionalidad territorial* de diversas alternativas o escenarios, lo que permite calcular los impactos acumulativos en el ámbito analizado. La exigencia democrática de consenso y transparencia hace que las decisiones deban de explicarse y negociarse en base a criterios objetivos. Este tipo de herramientas se dirigen, justamente, a definir y precisar los argumentos que plantea un determinado plan o programa en relación al tratamiento del territorio como sistema, y a comunicarlos de forma comprensible, y no tanto a descubrir soluciones impensadas o a "sustituir" el carácter finalmente humano de una determinada decisión.

En esencia, se pretende abordar la necesidad de disponer de metodologías que faciliten hacer compatible el desarrollo socioeconómico del país con el mantenimiento de los sistemas naturales y agrarios. La aplicación de las métricas pone de manifiesto que ningún espacio protegido puede

substraerse a las dinámicas que se dan en la matriz territorial. Nunca se había contado con una constatación cuantitativa de hasta a qué punto esto es cierto para el conjunto de la región metropolitana de Barcelona: si no incorporamos elementos de la matriz en la red de espacios protegidos, la mera preservación de parques naturales no garantiza la funcionalidad del territorio para albergar especies y procesos ecológicos. El trabajo pretende establecer directrices secuenciales (preventiva, correctiva y compensatoria) para la planificación territorial y la evaluación ambiental estratégica, procesos que deben avanzar en paralelo. Estas directrices, que se desarrollan desde una perspectiva ecológica, deben integrarse con otros campos de conocimiento y actores decisivos en la transformación del territorio, para elaborar una propuesta de ordenación completa de los espacios abiertos.

Se requiere, por tanto, un *modelo* territorial que establezca los objetivos estratégicos de sostenibilidad. También resulta necesario alcanzar un consenso científico para valorar la magnitud y naturaleza de los impactos en relación a estos objetivos. No obstante, el debate de fondo de las políticas de sostenibilidad está en la percepción de unos límites difícilmente objetivables. En este sentido, la mayoría de planes y Agendas 21 locales requieren, aparte de una base científica objetiva —condición necesaria pero no suficiente— un análisis de los principales actores territoriales y de sus interrelaciones, aceptando la diversidad de percepciones para una correcta gobernabilidad del territorio.

6. EPÍLOGO

En origen, cuando el ser humano alza la mirada y percibe la complejidad del mundo que lo rodea, intenta comprenderla de la única forma posible, es decir, abrazándola en su totalidad. Etimológicamente “comprender” viene de “comprimir”, sin embargo, al reducir la complejidad que queremos entender al estudio de sus partes, las propiedades emergentes del sistema se difuminan de forma similar a apretar agua entre las manos. Es por este motivo que nuestra percepción del paisaje fue, antes que nada, expresada de forma holística, mediante los

sentimientos y el arte (WAGENSBERG, 1985). Hasta que la ciencia no fue capaz de tratar el concepto de paisaje, de concebirlo de forma sistémica como un algoritmo, no nos dimos cuenta de que precisamente es el aspecto que percibimos del territorio, una representación de la realidad que nos rodea. La ciencia no trata del “por qué”, sino del “cómo” y, aunque no sabemos las causas, la naturaleza también puede expresarse —además de mediante la pintura o la poesía, pongamos por caso— con las matemáticas. Nace, entonces, la métrica del paisaje.

Territorio y paisaje pasan a ser conceptos correlativos: el territorio, un sistema; el paisaje, un algoritmo (FOLCH, 2003). Conocimiento construido sobre una matriz biofísica —y los procesos que tienen lugar en ella— sin la cual estaríamos hablando sencillamente de un mundo virtual, imaginario: las matemáticas pueden describir formalmente infinitos universos, pero nosotros —en principio— sólo vivimos en uno. No obstante, a todo lo que puede aspirar una aproximación matemática que pretenda describir un sistema tan complejo y multidimensional como es la matriz territorial, no deja de ser el equivalente a una humilde representación pictórica, trazada a grandes trazos. Pero si la elección de la métrica es la adecuada, entonces puede conseguir un efecto similar al de una buena pintura impresionista: transmitir al observador una imagen sintética, creíble, sugerente.

En la actualidad, existe una importante corriente de pensamiento —con pocos ejemplos prácticos— para cambiar la relación tendencial entre crecimiento urbanístico y matriz biofísica, que se fundamenta en el conocimiento y la prudencia. Este modelo propone una estructura en red de ciudades intermedias, compactas y diversas, articuladas con un mosaico agroforestal coherente, mediante un proceso casi fractal que evite la conurbación dispersa. Se trata de actuar en el territorio levemente, sin prepotencia. De acuerdo con el urbanista Ruben Pesci, resulta extremadamente difícil pretender gobernar la incertidumbre de la complejidad, por esto propone “adaptarse a navegar con levedad, como con las técnicas que se utilizan en un velero”. Para conseguirlo, seguramente, se necesitan “nuevas audacias hacia a una nueva libertad” (PESCI, 2000).

BIBLIOGRAFÍA

- ACEBILLO, J. & R. FOLCH (ed.). 2000. *Atles Ambiental de l'Àrea de Barcelona. Balanç de recursos i problemes*. Editorial Ariel & Barcelona Regional.
- ANDREARSEN J. K. & R. V. O'NEILL & R. NOSS & N. C. SLOSSER (2001): "Considerations for a terrestrial index of ecological integrity". *Ecological Indicators*, 1: 21-35.
- CHETKIEWICZ, C. L. B. & C. C. S. CLAIR & M. S. BOYCE (2006): "Corridors for Conservation: Integrating Pattern and Process". *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37: 317-342.
- DAZZINI, M. 2007. *Highways and Landscape Fragmentation in Northern Florida: A GIS-based Comparison of Landscapes in 1973, 1990, and 2000*. Master of Science. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- FOLCH, R. (coord.) (2003): *El territorio como sistema. Conceptos y herramientas de ordenación*. Diputación de Barcelona.
- FORMAN, R. T. T. (1995): "Some general principles of landscape and regional ecology". *Landscape Ecology*, 10: 133-142.
- (2004): *Mosaico territorial para la región de Barcelona*. Barcelona Regional. Editorial Gustavo Gili.
- & M. GORDON (1986): *Landscape Ecology*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- MALLARACH, J. M. & J. MARULL (2006): "Impact assessment of ecological connectivity at the regional level: recent developments in the Barcelona Metropolitan Area". *Impact Assessment and Project Appraisal*, 24: 127-137.
- & J. PINO (2006): "La conectividad ecológica en la planificación y la evaluación estratégica: aplicaciones en el área metropolitana de Barcelona", *CyTET*, 38 (147): 41-59.
- (2007): "Aportaciones de l'índex de connectivitat ecològica a la planificació territorial i l'avaluació ambiental estratègica, en el context de les recerques i les polítiques de connectivitat ecològica a Catalunya". *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 51: 113-128.
- MARGALEF, R. (1977): *Ecología*. Editorial Omega.
- (1991): *Teoría de los sistemas ecológicos*. Universidad de Barcelona.
- GONZÁLEZ-BERNALDEZ, F. (1981): *Ecología y paisajee*. Editorial Blume, Barcelona.
- MARULL, J. (2005): *Metodologías paramétricas para la evaluación ambiental estratégica*. Ecosistemas, 14 (2). En línea: <http://www.revistaecosistemas.net>.
- MARULL, J. & J. M. MALLARACH (2005): "A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area". *Landscape and Urban Planning*, 71: 243-262.
- MARULL, J. & J. PINO & E. TELLO & J. M. MALLARACH (2006): "Análisis estructural y funcional de la transformación del paisaje agrario en el Vallès durante los últimos 150 años (1853-2004): relaciones con el uso sostenible del territorio". *Áreas. Revista Internacional de Ciencias Sociales*, 25: 105-126.
- MARULL, J. & J. PINO & J. M. MALLARACH & M. J. CORDOBILLA (2007): "A Land Suitability Index for Strategic Environmental Assessment in metropolitan areas". *Landscape and Urban Planning*, 81: 200-212.
- MAY, R. M. (1989): *Ecological Concepts*. Blackwell, Oxford.
- MC HARG, I. (1969). *Proyectar con la Naturaleza* (ed. 2000). Editorial Gustavo Gili, Barcelona.
- NAVEH, Z. & A. S. LIEBERMAN (1984): *Landscape Ecology: Theory and application*. Springer-Verlag, Nueva York, USA.
- OPPDAM, P. & R. FOPPEN & C. VOS (2001): "Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape ecology". *Landscape Ecology*, 16: 767-779.
- PESCI, R. (1999): *La ciudad de la urbanidad*. Fundación Centro de Estudios de Proyección Ambiental. La Plata, Argentina.
- (2000): *Del Titanic al velero*. Editorial Ambiente & Fundación Centro de Estudios de Proyección Ambiental. La Plata, Argentina.
- PINO, J. & F. RODÀ (1999): "L'ecologia del paisatge: un nou marc de treball per a la ciència de la conservació". *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural*, 67: 5-20.
- REES, W. & M. WACKERNAGEL. (1996): *Our Ecological Footprint*. The New Catalyst, Bioregional series, Canadá.
- RUEDA, S. (2002): *Barcelona, ciutat mediterrània, compacta i complexa. Una visió de futur més sostenible*. Agència Local d'Ecologia Urbana de Barcelona. Ajuntament de Barcelona.
- STOMS, D. & J. M. McDONALD & F. W. DAVIS (2002): "Fuzzy Assessment of Land Suitability for Scientific Research Reserves". *Environmental Management*, 29: 545-558.
- SANTOS, K. C. & J. PINO & F. RODA & M. GUIRADO & J. RIBAS (2007): "Beyond the reserves: The role of non-protected rural areas for avifauna conservation in the area of Barcelona (NE of Spain)". *Landscape and urban planning*, en prensa.
- TELLO, E. & R. GARRABOU & J. R. OLARIETA & X. CUSSÓ (2006): "From integration to abandonment. Forest management in the Mediterranean agro-ecosystems before and after the 'green revolution' (The Vallès County. Catalonia, Spain, 1860-1999)", en J. PARROTTA & M. AGNOLETTI & E. JOHANN (eds.): *Cultural heritage and sustainable forest management: The role of traditional knowledge*, 339-346, Ministerial Conference for the Protection of Forest in Europe/IUFRO. Varsovia.
- TERRADAS, J. (2001): *Ecología urbana*. Editorial Rubes.
- TURNER, M. G. (2005): "Landscape Ecology: what is the state of the science?". *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 36: 319-344.
- WAGENSBERG, J. 1985. *Ideas sobre la complejidad del mundo*. Editorial Tusquets.
- WU, J. & R. HOBBS (2002): "Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis", *Landscape Ecology*, 17: 355-365.