

Propuesta de una nueva metodología para la ubicación de infraestructuras viarias ambientalmente sostenibles. Aplicación en el tramo viario de la pedemontana Fabriano-Muccia

A proposal of a new methodology for best location of environmentally sustainable roads infrastructures. Validation along the Fabriano-Muccia road

M. Neri^(*), M. E. Menconi^(*), M. Vizzari^(*), Vincenzo G. G. Mennella^(*)

RESUMEN

El trabajo contempla la creación de un modelo para definir la mejor localización en el territorio de nuevos proyectos de infraestructuras viarias y su convalidación en una carretera que forma parte de un proyecto de gran envergadura denominado Cuadrilátero Marcas-Umbria, en vías de realización. El objetivo del trabajo consiste en la puesta a punto de una herramienta ágil y versátil, capaz de sopesar, interpretándolos de forma correlacionada, los distintos aspectos de carácter medioambiental, socioeconómico, técnico y operativo, ligados a la construcción de una obra viaria. Se ha prestado especial atención a las dinámicas de uso y consumo de los hábitats naturales y a las problemáticas vinculadas a los fenómenos de fragmentación ecológica provocados por la red viaria y los asentamientos. La metodología que se ha puesto a punto prevé la recogida y la implementación, dentro de un sistema de información territorial dedicado, de un amplio abanico de datos capaces de definir las características peculiares del ámbito que es objeto del estudio, posteriormente interpretados y reconducidos a síntesis mediante la aplicación de una serie de indicadores específicos. Los indicadores definidos se incorporan posteriormente mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio para definir un índice de evaluación sintético capaz de estimar de forma correlacionada la sensibilidad del territorio ante la introducción de nuevas infraestructuras viarias. Para convalidar la metodología, los índices propuestos se han aplicado a un área de estudio donde se está construyendo una infraestructura viaria de importancia considerable para las conexiones transversales de Italia central.

Palabras clave: infraestructuras viarias, sostenibilidad, sistema de información territorial, indicadores, análisis multicriterios.

SUMMARY

This study deals with the creation of a model to define the best allocation within the area of new projects for road infrastructures, and to evaluate the effectiveness of a road which is part of a wide-ranging project currently under construction, known as the Marches-Umbria Quadrilateral Project. The aim of the work is to develop a speedy, versatile instrument which will be able not only to calculate but also to interpret and correlate the various environmental, social, economic, technical and operational aspects of the construction of road works. Special attention is paid to the dynamics of the use and consumption of the natural habitats and the problems linked to the phenomena of ecological fragmentation caused by the road network and by settlements. The methodology which has been developed includes the collection and implementation within a dedicated territorial informative system of a wide range of information capable of defining the special characteristics of the area under study, which will then be interpreted and summarised by means of the application of a series of specific indicators. The defined indicators are subsequently integrated by applying techniques of multi-criterial analysis to define an index of concise evaluation capable of assessing and supporting the sensitivity of the territory to the integration of new road infrastructures. In order to validate the methodology, the proposed indices were applied to a study area in which a road infrastructure of considerable importance is currently being built to link central Italy from one side of the country to the other.

113-92

Keywords: roads infrastructures, sustainability, indicators, geographic information system. Multicriterial analysis.

^(*)Dipartimento Uomo&Territorio, Università di Perugia (Italia)

Persona de contacto/Corresponding author: v.mennella39@alice.it (Vincenzo G. G. Mennella)

1. INTRODUCCIÓN

La red viaria representa la forma más difusa de modificación del paisaje, ya que la construcción de una carretera genera una compleja serie de impactos en los ecosistemas, que van desde la pérdida definitiva de hábitats naturales hasta la compromisión de la continuidad medioambiental (1). El proceso de fragmentación del territorio comporta la destrucción y transformación de los entornos naturales, la reducción de la superficie de los mismos y el aumento del aislamiento, incluyendo de esta forma en la estructura y la dinámica de determinadas poblaciones y especies animales y vegetales sensibles, hasta alterar los parámetros de comunidad, las funciones del ecosistema y los procesos ecológicos. Además, la construcción de una nueva carretera con gran capacidad de tráfico es capaz de generar una serie de efectos consecuentes ligados al aumento y la difusión capilar de los asentamientos (centros comerciales, oficinas, edificios de viviendas, estructuras deportivas y recreativas) que amplifican el impacto base de la obra (2).

La mayoría de las actividades de investigación que tienen como finalidad reducir el impacto en los ecosistemas debido a la movilidad están orientadas tanto a adoptar soluciones técnicas y de proyecto a utilizar en la fase de construcción de la obra y capaces de compensar o reducir impactos en todo caso inevitables (aplicación de firmes capaces de reducir al impermeabilización del suelo y la contaminación acústica, la construcción de pasos subterráneos y viaductos para facilitar el paso de la fauna, incorporación de medios de disuasión para impedir el paso de animales por las carreteras y evitar así que sean atropellados, o el impacto de los pájaros contra las barreras de absorción de ruidos colocadas en los arcones de las carreteras que pasan cerca de núcleos de población), como a identificar las rutas de menor impacto en las que basar los proyectos de obras viarias. En cuanto a este segundo ámbito, se dedica especial atención al análisis y la gestión de los fenómenos de fragmentación ecológica provocados por las infraestructuras de transportes. Por la aplicación de índices, cuales el índice de diversidad biológica (3), el índice de homogeneidad (4), el índice de riqueza específica (5) y el índice de fragmentación ecológica (6) es posible identificar áreas de mayor valor ecológico donde no debería ser posible la construcción de nuevas obras infraestructurales.

Además, el desarrollo de las metodologías ligadas al análisis multicriterio y de tecnologías avanzadas de gestión territorial de los datos (7) (Sistemas de Información Geográfica) permite hoy en día establecer una corre-

lación entre la elevada y pormenorizada mole de información relacionada con los aspectos medioambientales con los datos relacionados con una pluralidad de factores (económico, sociocultural y de viabilidad técnico-operativa de un proyecto).

Cabe reconducir al análisis multicriterio MCDA (Multi Criteria Decision Aid) una pluralidad de técnicas que tienen como finalidad común establecer unos procedimientos de comparación con criterios múltiples cuyo objetivo consiste en contribuir al desarrollo de un íter de aprendizaje complejo e integrado capaz de sostener un proceso decisional (8-10). El análisis multicriterio permite racionalizar el proceso de elección de las alternativas de proyecto en base a una pluralidad de criterios a los que puede atribuirse un peso diferente según la prioridad que los mismos asumen dentro de la evaluación. De esta forma pueden abarcarse en un solo procedimiento de evaluación tanto los criterios de carácter económico, cuantificables en dinero, como los criterios extraeconómicos (medioambientales, socioculturales), que únicamente pueden medirse en términos físicos y cualitativos; comparando informaciones entre las cuales no puede establecerse una relación directa e interpretándolas en base a una serie de criterios establecidos de antemano resulta fácil definir alternativas de proyecto entre las que elegir aquella que, en conjunto, cumpla el mayor número de criterios de evaluación.

De forma paralela, el advenimiento de los Sistemas de Información Geográfica ha permitido aumentar todavía más la potencia y eficacia de dichas metodologías (11). Con estos sistemas puede manejarse una cantidad de información virtualmente infinita, cotejando datos entre sí y reelaborándolos, relacionándolos directamente con porciones de territorio bien determinadas desde el punto de vista geográfico. A través de un proyecto de Gis, implementado en una realidad territorial determinada, es posible monitorizar continuamente sus transformaciones y simular posibles escenarios de desarrollo. La capacidad de llevar a cabo análisis complejos y de simular los principales impactos y vías de desarrollo debidas a los procesos de planificación y proyecto que se van configurando con el tiempo convierte a estos instrumentos en válidos medios de apoyo a las decisiones. (12).

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo estriba en la creación de una metodología rápida, versátil y fácil de reproducir (y por tanto capaz de convertirse

en un instrumento de uso corriente durante el desarrollo y/o la evaluación de proyectos) como soporte de la planificación sostenible de nuevos itinerarios viarios. Dicha metodología debería evaluar los puntos críticos existentes en la fase de evaluación de los impactos de proyectos ya predispuestos, o de identificar el trazado ideal a partir de una demanda de conexión, en base al trazado de un mapa de sensibilidad del territorio. Consecuentemente el objetivo principal del trabajo es la construcción de un índice sintético capaz de valorar la sensibilidad del territorio, graduando el valor total del territorio, su susceptibilidad y sensibilidad en relación a la presión antrópica y de determinar, pues, los ámbitos que mejor pueden sostener el impacto debido a la incorporación de una nueva infraestructura de transporte.

El objetivo del presente trabajo consiste asimismo en la aplicación de la metodología puesta a punto a un caso de estudio que es objeto de un proyecto de construcción de una nueva infraestructura viaria, para verificar su capacidad de evaluar la sostenibilidad del trazado de proyecto y los puntos más críticos en base al cálculo del índice predispuesto. El área de estudio elegida se encuentra a caballo entre Umbría y Marcas, y se ve afectada por un amplio proyecto de desarrollo de infraestructuras denominado "Cuadrilátero de Penetración Interna Umbría-Marcas" (Fig. 1); concretamente, se ha tomado en consideración el proyecto de un nuevo trazado denominado "Pedemontana Fabriano-Muccia".

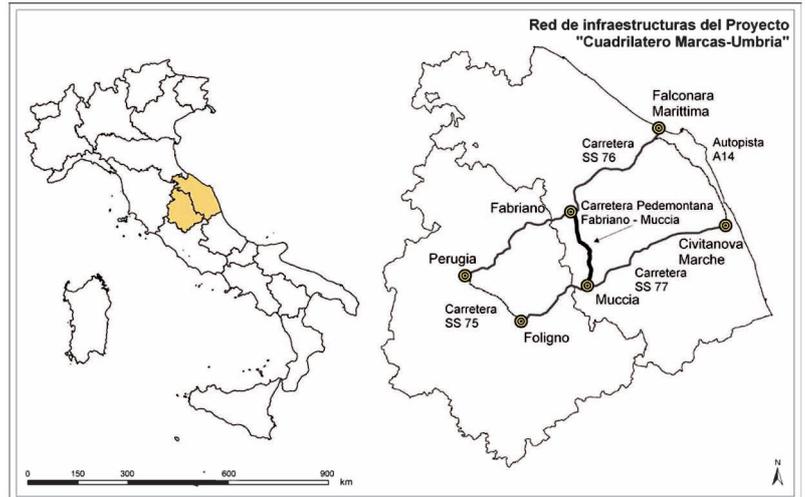
3. METODOLOGÍA

La predisposición del marco de referencia analítico representa la primera y fundamental fase del trabajo, y consiste en recoger, estudiar y analizar los datos fundamentales sobre el área de estudio, con el fin de proporcionar una lectura que abarque todos los elementos estructurales que lo definen (Fig.2).

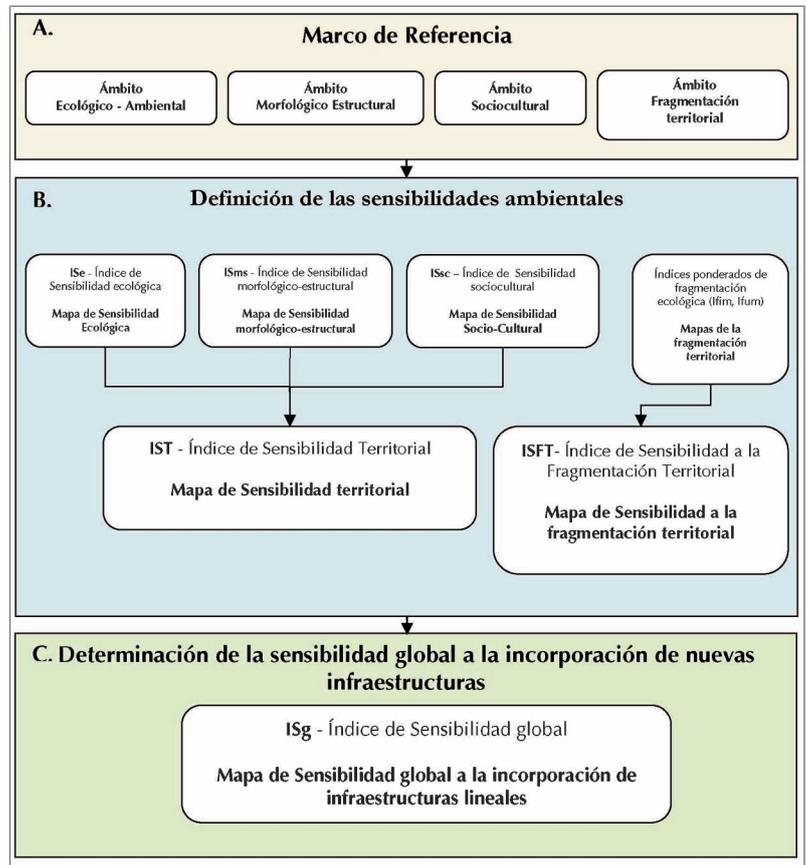
Para simplificar la fase de recogida de datos y hacer que sea fácil de repetir en los distintos contextos territoriales, se decidió utilizar principalmente datos de cobertura nacional y fácil interpretación, que se organizaron en cuatro macroámbitos estructurales (Ecológico-Ambiental, Morfológico-Estructural, Socio-Cultural y de la Fragmentación Territorial):

Ambito Ecológico-Ambiental:

Datos adquiridos en entorno Gis correspondientes a los recursos naturales. Los primeros



1



2

datos a recoger para el área de estudio con el fin de perfilar un censo a grandes rasgos de dichos recursos son: el Corine Land Cover (fuente de los datos: Proyecto Europeo Corine Land Cover 2000), estimación de la biodiversidad de los vertebrados (fuente de los datos: Ministerio de Medio Ambiente, REN, Red Ecológica Nacional), áreas naturales protegidas SIC,ZPS, parques (fuente de los datos: Organismo de investigación ISPRA

1. Ámbito geográfico de referencia del área objeto de evaluación.

2. Esquema sintético de las fases que identifican la articulación metodológica para el emplazamiento ideal de nuevas infraestructuras lineales.

Instituto Superior de Protección e Investigación Medioambiental).

El dato Corine, relacionado con la cobertura del suelo, se ha interpretado en base a la investigación relacionada con las redes ecológicas del Proyecto Planeco (13). En la misma se clasifican las tipologías de cobertura del suelo en áreas biopermeables (cultivos agrícolas, bosques, pastos, matorral, vegetación esclerófila, bosque y matorral en evolución, playas, dunas, rocas desnudas, vegetación escasa, áreas que han sufrido incendios y cuencas de agua) y en áreas no biopermeables, representadas por los restantes usos del suelo.

En esta acepción, la biopermeabilidad indica todas las porciones de territorio no afectadas por la urbanización o, en cualquier caso, por formas de un uso antrópico masivo. El análisis de la biopermeabilidad permite, por un lado, describir el territorio en función de su capacidad de conexión ecológica y, por otro, definir de forma implícita las áreas que siguen manteniendo un buen nivel de calidad medioambiental y a las que, por tanto, deberá prestarse mayor atención a la hora de localizar las actuaciones de proyecto.

Los valores de biodiversidad empleados son los producidos por la REN (14), y proceden de una estimación efectuada a través de la aplicación de modelos de idoneidad medioambiental que permiten valorar la distribución potencial de las especies animales en relación al cumplimiento de las necesidades sinecológicas de cada especie. La elaboración del modelo ha previsto un proceso para el que, a partir de una evaluación general de los tipos de entorno existentes en el territorio nacional, se identifican de forma preliminar las áreas potencialmente ideales para la presencia de cada especie.

En lo que se refiere a las áreas protegidas, se implementan en el Gis sencillamente a través de sus límites, sin entrar en detalles sobre la tipología de área.

Ambito Morfológico-Estructural:

Datos adquiridos en entorno Gis correspondientes a las características morfológicas y estructurales de los suelos útiles para proporcionar indicaciones a escala de planificación de la viabilidad técnica, económica y operativa de un proyecto para un nuevo trazado viario. Los datos introducidos en este ámbito son: Modelo digital del terreno y datos geolitológicos (fuente de los datos: regiones afectadas por la actuación).

El Modelo digital del terreno es un elemento indispensable para formular las primeras

consideraciones morfológicas del territorio en función de las características altimétricas y su evolución como consecuencia de los procesos naturales y antropogeográficos que se instauran en el mismo. La variación local de la morfología del terreno influye profundamente en la biosfera, el microclima, el ciclo hidrológico y, en general, en la distribución de las actividades humanas en el territorio.

La información geolitológica proporciona indicaciones acerca del origen y la asociación de las rocas (formaciones geológicas, naturaleza, yacimiento, distribución espacial de rocas y terrenos superficiales).

Dicha información constituye la base para comprender las distintas fenomenologías relacionadas con el uso y el "consumo" del suelo (erosión, desestabilizaciones, dinámica de las aguas superficiales y subterráneas, tipologías de suelo y desarrollo de un manto vegetal).

Ambito Sociocultural:

Datos adquiridos en entorno Gis correspondientes a la concentración de asentamientos y a los valores culturales del paisaje. La información utilizada para describir esta componente es la siguiente: asentamientos, infraestructuras viarias existentes (fuente: ISTAT Instituto Nacional de Estadística) y emergencias histórico-arquitectónicas (fuente de los datos: regiones afectadas por la actuación).

La descripción de la estructura de los asentamientos existentes en el territorio en cuanto a distribución de los núcleos de población y dimensiones demográficas de los mismos (número de habitantes por cada asentamiento) está en función de la determinación de la demanda potencial de conexiones infraestructurales (a áreas con mayor concentración de asentamientos les corresponde igual demanda de conexiones con otros núcleos de población, y más en general, con el territorio), mientras que la identificación del sistema de comunicaciones ya existente en el área de estudio permite determinar la oferta de comunicación potencial (puesto que no entramos en detalles acerca de la eficiencia y tipología de la infraestructura).

Se decidió dedicar un layer oportuno en este ámbito a las emergencias histórico-culturales existentes en el territorio analizado, ya que representan recursos clave para reconstruir los itinerarios del proceso de transformación histórica del paisaje, a la vez que constituyen la riqueza del territorio desde el punto de vista del patrimonio cultural.

Ambito de la Fragmentación Territorial:

Datos adquiridos en entorno Gis correspondientes a los principales elementos lineales (infraestructuras) y de área (asentamientos) de fragmentación existentes en el territorio (fuente de los datos: ISTAT Instituto Nacional de Estadística).

La capacidad de generar elementos de corte del mosaico paisajístico (con efectos importantes incluso en términos de conservación de los hábitats naturales y la biodiversidad) representa una característica peculiar del desarrollo infraestructural viario (y más en general de todo lo que puede reconducirse a la expansión de los asentamientos en el territorio). Por tanto, a la hora de proyectar el trazado de una nueva carretera, se convierte en un factor de evaluación importante conocer el grado de fragmentación del territorio antes de incorporar un nuevo proyecto.

Para interpretar dicho aspecto, se decidió sopesar por separado los elementos lineales y los de área en base a experiencias anteriores (15,16), ya que dan lugar a formas de fragmentación con características diferentes.

Las carreteras representan un elemento decisivo para la fragmentación territorial, ya que tienden a difundirse de forma capilar y continua en el territorio. El desarrollo de los trazados viarios contribuye a determinar diversos efectos de barrera en relación a la anchura de la calzada y al volumen de tráfico que soportan. Cuanto mayores sean la anchura de la calzada y la densidad del tráfico, mayores serán los efectos en cuanto a disminución de la movilidad de los animales y aislamiento de los asentamientos. Los efectos más marcados de este fenómeno se observan a nivel de los mamíferos terrícolas, reptiles, anfibios e invertebrados terrestres.

Para valorar dichos factores, las infraestructuras viarias se integran dentro del proyecto dedicado, tanto en términos de longitud de cada tramo como de anchura de la calzada.

Las áreas urbanas, con su desarrollo cada vez más difuso y complejo, suponen un importante factor barrera para la movilidad de los animales, ya sea de tipo material (la construcción) como inmaterial (molestias sonoras, molestias debidas a la superpoblación humana, mala calidad del aire, contaminación lumínica). La distribución espacial del asentamiento es un parámetro importante para valorar el grado de fragmentación que provocan. A iguales dimensiones, como es fácil de entender, asentamientos más concentrados provocan menores efectos de fragmentación.

El paso sucesivo constituye en la identificación de los índices dedicados a valorar, por una parte, la sensibilidad del territorio bajo los aspectos ecológico-ambientales, técnico-proyectuales y socio-culturales y, por otra, su nivel de fragmentación.

La información obtenida se sintetiza en otros tantos índices (de sensibilidad ecológica, de sensibilidad morfológico-estructural, de sensibilidad sociocultural, de fragmentación generada por las infraestructuras y los asentamientos), capaces de mejorar la interpretación de la variabilidad espacial de los niveles temáticos y de facilitar la comparación de los mismos.

Para elaborar los índices, se decidió agregar y asignar valores diferenciados a las componentes territoriales estudiadas, programando un sencillo análisis jerárquico con matrices de comparación por pares (17,18) valoradas dentro de un amplio grupo de trabajo formado por expertos del sector (19).

Siempre dentro del mismo grupo se discutieron los pesos a asignarle a cada elemento considerado, que seguidamente reproducimos puntualmente. De este modo, la componente de subjetividad en las decisiones se medió en primer lugar compartiendo la información en el seno de un grupo de trabajo más amplio, y luego se hizo explícita con el fin de permitir que pudieran modificarla fácilmente terceras personas en caso de que se justificaran las asignaciones de distintos valores.

Como veremos más adelante, para cada uno de los índices construidos se decidió reconducir la variabilidad y la heterogeneidad de los datos recogidos para cada área temática dentro de una escala de valores normalizados y posteriormente redistribuidos en un intervalo variable de un mínimo de 0 a un máximo de 5, donde al cero se le atribuyó el valor más bajo de sensibilidad a la introducción y al 5 el más alto. Dicho procedimiento permite estandarizar todos los factores considerados en una escala común y continua de idoneidad, y facilitar así el cotejo de datos de diferente carácter. La elección del intervalo especial de valores tiene la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados de prestaciones asociadas a cada criterio sobre una base de tipo nominal (entre 0 y 1 baja sensibilidad, 1-2 sensibilidad medio-baja, 3-4 sensibilidad medio-alta, 4-5 alta sensibilidad).

La idea de base en la construcción del índice consiste en buscar la manera más sencilla de considerar todos los elementos adquiridos para cada ámbito de análisis, y por eso se ha recurrido a menudo a simples sumas ponderadas de los factores normalizados.

La introducción de índices que estiman el grado de fragmentación del territorio provocada por la presencia de la red viaria y el desarrollo de la trama urbanística permite considerar la capacidad inherente al desarrollo de la trama urbanística y a la del sistema de transportes de provocar brechas en el mosaico territorial.

Dichos índices se determinan adaptando a las características del estudio los índices IFI – “Infraestructural Fragmentation Index”, y UFI – “Urban Fragmentation Index” (20). Los índices de fragmentación, por regla general, se calculan tomando como referencia unidades de área básicas (términos municipales, provincias, unidades de paisaje, etc.). En este caso, con el fin de calcular a nivel local los niveles de fragmentación asociados a las infraestructuras y a las áreas urbanizadas, ambos índices se han determinado con referencia a una malla cuadrada de 1 km de lado. La elección de esta peculiar unidad de referencia (la malla cuadrada) está motivada por la necesidad de una base de análisis objetiva y uniforme para todo el territorio analizado. En cuanto al tamaño de la malla, se optó por 1 km porque la escala de estudio del trabajo es amplia (los datos recogidos en el Gis están a escala 1:100.000), pero puede adaptarse en todo momento a las necesidades de las diferentes aplicaciones.

El IFI estima la fragmentación derivada de la articulación del desarrollo infraestructural en el territorio tomando en consideración los distintos niveles de efecto barrera asociados a las diferentes tipologías de carreteras y la longitud de los trazados. Por lo tanto, el indicador tendrá un valor tanto más elevado cuanto más densa y apretada sea la trama viaria. Su formulación adaptada a la aplicación metodológica en cuestión es la siguiente:

$$Ifim = \sum \frac{Li * li}{Au}$$

Ifim : índice de fragmentación lineal metodológica

Li : longitud del iésimo tramo de viabilidad

li : anchura de la calzada del iésimo tramo de viabilidad

Au : superficie de la unidad territorial (celda de 1km²) de cálculo del índice

El UFI establece el valor del nivel de fragmentación de los hábitats inducido por el desarrollo de los asentamientos urbanos. En particular, este índice permite estimar el efecto barrera en la geografía de los hábitats, teniendo en cuenta la forma de las áreas urbanizadas. Los asentamientos que se caracterizan por un desarrollo lineal dan lugar a un efecto de corte mayor a nivel de los sistemas ecológicos, y, por tanto, al aumento de la longitud y el área de los asentamientos le

corresponderá un incremento del valor del índice en cuestión.

En este caso, el índice original también se modificó en parte para adaptarlo a las necesidades del trabajo:

$$Ufim = \frac{1 - \left(\frac{\sum Api}{\sum Aci} \right)}{N} * \frac{\sum Api}{Asp}$$

Ufim: índice de fragmentación del área de metodología

Api: Área del iésimo elemento poligonal de fragmentación (asentamiento);

Aci: Área de la circunferencia ideal (circunferencia que posee el mismo perímetro que el iésimo elemento poligonal de fragmentación);

Asp: Área de la unidad territorial de referencia (celda cuadrada de 1 km de lado);

N: número de fragmentos en que se subdivide la unidad territorial de referencia

El paso final del trabajo es la definición de un índice de sensibilidad global del territorio a la incorporación de una nueva infraestructura representable mediante un gradiente georeferenciado en el área objeto de estudio.

Dicho índice, una vez identificada la necesidad de conexión entre dos nudos, puede utilizarse como base a partir de la cual definir un pasillo ideal de bajo impacto ecológico dentro del cual construir la vía en cuestión (v. Fig.2).

4. RESULTADOS

Seguidamente se detallan los índices que se han puesto a punto:

Índice de Sensibilidad Ecológica (ISE)

El Índice de Sensibilidad Ecológica estima la sensibilidad del territorio ante la introducción de una nueva infraestructura viaria en función de los valores de tipo naturalista por los que se caracteriza cada contexto. Los datos de los que se partió para calcular dichos índices están presentes en el ámbito de análisis relacionado con la componente ecológico-ambiental (biopermeabilidad derivada del Corine, biodiversidad tal como se indica en la Red Ecológica Nacional, áreas de especial interés).

El índice tiene como finalidad la conservación de las áreas que todavía no se han visto comprometidas por el desarrollo antrópico, con especial atención a los efectos provocados por la fragmentación medioambiental.

La fórmula que describe el cálculo de dicho índice es la siguiente:

$$ISE = Biop + Biodiv_p$$

ISE: índice de sensibilidad ecológica

Biop: valor biopermeabilidad

Biodiv_p: valor de biodiversidad ponderado

Biopermeabilidad (Biop): Los valores de biopermeabilidad adoptados en la metodología Planeco están agrupados en 5 clases iguales con valores que van de 0 a 5, donde el valor 0 corresponde a las áreas no biopermeables, y la máxima puntuación a los usos del suelo clasificados como biopermeables.

Biodiversidad ponderada (Biodiv. P.): Los valores de presencia de especies estimados para construir la red ecológica nacional se normalizan subdividiéndolos en 5 clases iguales, con valores de 0 a 5. Además, se decidió multiplicar el valor de la clase de pertenencia por 1.5 en el caso en que el punto caiga en un área protegida, ya que dicha biodiversidad tiene mayores probabilidades de mantenerse y, por tanto, asume también un valor más elevado.

Por tanto, a valores del ISE más altos les corresponde una menor propensión del territorio a la construcción de una nueva obra viaria.

Índice de Sensibilidad Morfológico-Estructural (ISME)

El Índice de Sensibilidad Morfológico-Estructural establece una relación entre las componentes territoriales de carácter físico que interactúan con el proyecto de un nuevo trazado viario a partir de los datos recogidos (Modelo digital del terreno y datos geolitológicos).

La extensión Spatial Analyst del software Arcgis permite calcular automáticamente un layer correspondiente a las pendientes de un área determinada a partir del modelo digital del terreno. La clinometría describe la inclinación topográfica de los suelos, y es un factor que puede jugar un papel fundamental, ya sea en relación a la estabilidad de las vertientes, como elemento que disminuye la cohesión de los terrenos, ya sea en lo tocante a las dificultades que surgen al construir nuevos proyectos de infraestructuras en áreas escarpadas en comparación con las áreas llanas. Los datos geolitológicos, junto con la información clinométrica, se utilizaron para identificar las clases de propensión a la desestabilización en base a una metodología análoga puesta a punto para el Plan de Coordinación Provincial de la Provincia de Perugia (20).

La propensión a la desestabilización es una estimación ligada al grado de estabilidad hidrogeológica de las vertientes, calcula la probabilidad de que se verifiquen desprendimientos y resulta de sumo interés a la hora de evaluar la sensibilidad del territorio ante la construcción de nuevas obras de infraestructuras. Estas dos informaciones confluyeron en un índice sintético fruto de la simple suma de los siguientes factores:

$$ISMS = IC + IPD$$

ISMS: Índice de sensibilidad morfológico-estructural

IC: clases de pendiente

IPD: clases de propensión a la desestabilización

Clases de pendiente (IC): Para evaluar este factor se decidió utilizar las clases de actividad elaboradas por Sabbatini (2) ligeramente modificadas (se unieron las dos últimas clases en una sola), y se les asignó un valor del indicador de 1 a 5, que representaban respectivamente los terrenos llanos y los terrenos con fuertes pendientes:

Clases de actividad de las vertientes (pendiente porcentual)	Descripción	Valores para calcular el indicador
0 - 5%	Terrenos llanos	1
5 - 10%	Vertientes con pendientes muy débiles	2
10 - 15%	Vertientes con pendientes débiles	3
15 - 30%	Vertientes con pendientes intermedias	4
> 30%	Vertientes con fuertes pendientes	5

Clases de propensión a la desestabilización (IPD):

A partir de las clases elaboradas para la realización del PTCP de Perugia se le asignaron al indicador unos valores de 0 a 3, que representaban respectivamente áreas de nula/alta propensión a la desestabilización:

Grados de propensión a la desestabilización	Características geológicas y clinométricas	Valores para calcular el indicador
Clase VI: Áreas con baja o nula propensión a la desestabilización	Afloran calizas mesozoicas, travertinos y vulcanitas. Pendientes inf. Al 10%	0
Clase III: Áreas con media y baja propensión a la desestabilización	Afloran las formaciones de Marnoso Arenacea, Bisciario, Escama Cinerea. Pendientes comprendidas entre el 10% y el 40% propensión a la desestab.	1
Clase II: Áreas con media y alta propensión a la desestabilización	Afloran las formaciones de Marnoso Arenacea, Bisciario, Escama Cinerea. Pendientes comprendidas entre el 10% y el 40%	2
Clase I: Áreas con elevada propensión a la desestabilización	Áreas afectadas actualmente por desprendimientos y áreas en que afloran arcillas escamosas	3

A los valores más altos de ISMS les corresponde una menor propensión del territorio a la construcción de una nueva infraestructura, tanto en términos de estabilidad de las vertientes como en referencia a las mayores problemáticas técnico-operativas que pueden presentarse al construir proyectos viarios en áreas con mayores pendientes.

Índice de Sensibilidad Sociocultural (ISSC)

El índice de sensibilidad sociocultural estima la sensibilidad del territorio ante la construcción de nuevas infraestructuras de comunicación, tomando en consideración tanto la demanda de conexiones (en función de la distribución de los núcleos de población, de las dimensiones de los mismos y de la densidad de población), como la protección de los recursos históricos y culturales. El ISSC se calcula estableciendo una relación entre los aspectos ligados a la densidad de población y a la presencia de valores histórico-arquitectónicos en el territorio, evaluando por una parte la propensión de las áreas con fuerte densidad residencial a conectarse mediante carreteras, y por otra el impacto potencial de nuevas infraestructuras dentro de áreas con una concentración relevante de emergencias histórico-arquitectónicas.

La fórmula es la siguiente:

ISSC = ISDI + P_emer_arq.
 ISSC: índice de sensibilidad sociocultural
 ISDI: índice de sensibilidad demográfica ante la construcción de infraestructuras
 P_emer_arq.: presencia de emergencias históricas

Índice de sensibilidad demográfica ante la construcción de infraestructuras (ISDI): Los asentamientos existentes en el territorio se subdividen en las tres clases siguientes según el número de habitantes, a las que se asigna un coeficiente ponderal cuya finalidad consiste en estimar una mayor demanda de conexión viaria a medida que nos acercamos a los núcleos de población con mayor densidad de población:

Clases de amplitud demográfica del asentamiento	Número de habitantes	Coficiente ponderal
1	≤ 5.000 habitantes	3
2	5.001 – 20.000 habitantes	2
3	20.001 – 100.000 habitantes	1

Este coeficiente se utiliza para multiplicar el peso asignado a cada punto del territorio según la distancia del núcleo de población más próximo:

Distancia (m)	Valores de sensibilidad/propensión a la conexión infraestructural
1.000-2.000	1
2.000-3.000	2
3.000-7.000	3
7.000-20.000	4
>20.000	5

Presencia de emergencias históricas (P_emer_arq.): valor 1 dentro de las áreas de respeto de 1 kilómetro en torno a cada emergencia histórica, y 0 para las áreas restantes.

A un valor más alto de ISSC le corresponde una menor demanda de comunicación local (escasa presencia de núcleos de población de cierto relieve) y/o la presencia de asentamientos históricos. Los datos obtenidos se normalizan luego en un intervalo de valores comprendidos entre 0 y 5.

Sensibilidad global a la introducción de infraestructuras de transporte

Agregando una vez más los índices se llegó a obtener un Índice de Sensibilidad Territorial (IST) y un Índice de Sensibilidad a la Fragmentación Territorial (ISFT), y luego se puso a punto un índice global de sensibilidad territorial (ISC). Para ello se utilizó un procedimiento de análisis jerárquico (21) organizado en base a una estructura reticular basada en 3 niveles sucesivos, capaz de descomponer el problema de evaluación en subproblemas más específicos tal y como representamos más adelante (Fig.3).

Al pasar de un nivel jerárquico inferior al siguiente, de mayor síntesis, se valora la aportación que da cada subcriterio al problema seleccionado. Las matrices de comparación por pares se enviaron junto con fichas de explicación de cada índice a un grupo considerable de expertos del sector, pidiéndoles que expresaran un juicio de dominancia en base a los siguientes valores (21,22):

- igual de importante respecto a (valor 1)
- ligeramente más importante (valor 3)
- más importante (valor 5)
- mucho más importante (valor 7)
- extremadamente más importante (valor 9)

Seguidamente se detallan los cuatro índices que se han puesto a punto:

Índice de Sensibilidad Territorial (IST)

La matriz de comparación por pare en el caso del Índice de Sensibilidad Territorial está formada por los tres índices de Sensibilidad Ecológica, Morfológico-Estructural y Sociocultural; el resultado de la comparación (el autovalor normalizado derivado del cálculo de la matriz cuadrada) es un coeficiente de dominancia (valor ponderal) con que se ponderan los valores de los índices asociados a los mismos con el fin de hacer que confluyan en un índice sintético definido como sigue:

$$IST = ISEp + ISMSP + ISSCp$$

IST: Índice de sensibilidad territorial

ISEp Índice de Sensibilidad Ecológica ponderado ($p=0,58$)

ISMSP: Índice de Sensibilidad Morfológico Estructural ponderado ($p=0,31$)

ISSCp: Índice de Sensibilidad Sociocultural ponderado ($p=0,11$)

La comparación por pares ha llevado a atribuirles mayor peso a las valoraciones en términos de conservación de los valores ecológicos del territorio y, de forma progresivamente decreciente, a los aspectos de tipo morfológico-estructural y sociocultural, por este orden.

Índice de Sensibilidad a la Fragmentación Territorial (ISFT)

Los dos índices de fragmentación lineal y de área que se han puesto a punto se han agregado con una sencilla suma ponderada con el fin de obtener el siguiente índice agregado de fragmentación:

$$IAF = Ifimp + Ufimp$$

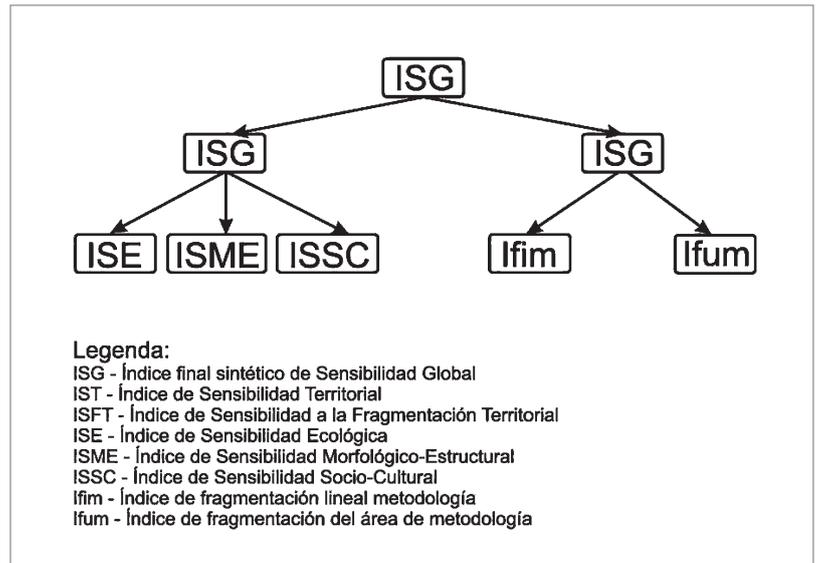
IAF: Índice Agregado de Fragmentación

Ifim : índice de fragmentación lineal metodología ponderado ($p=0,8$)

Ufim: índice de fragmentación de área metodología ponderado ($p=0,2$)

En este caso, el peso mayor se le atribuye al índice de fragmentación por infraestructuras habida cuenta de la mayor influencia en términos de invasividad y capacidad de crear barreras en el territorio; los valores del índice IAF se reconducen a un intervalo comprendido entre 0 y 5.

Durante la construcción del iter metodológico se decidió programar una modalidad de cálculo del índice que priorizara la salvaguardia de los valores ecológicos que todavía se conservaban respecto a la recuperación de las áreas comprometidas, invirtiendo los valores resultantes del cálculo del IAF con una simple diferencia. El índice resultante es el siguiente:



3

$$ISFT = 5 - IAF$$

ISFT: Índice de Sensibilidad a la Fragmentación Territorial

IAF: Índice Agregado de Fragmentación

Índice de Sensibilidad Global (ISG)

Con el fin de crear un gradiente georreferenciado de aptitud/sensibilidad a la introducción de una nueva infraestructura viaria en el territorio, los dos índices anteriores se agregan nuevamente en un Índice final sintético de Sensibilidad Global (ISG) que se sitúa en el vértice de la estructura jerárquica analizada:

$$ISG = ISTp + ISFTp$$

ISG: Índice de Sensibilidad Global

ISTp Índice de Sensibilidad Territorial ponderado ($p=0,67$)

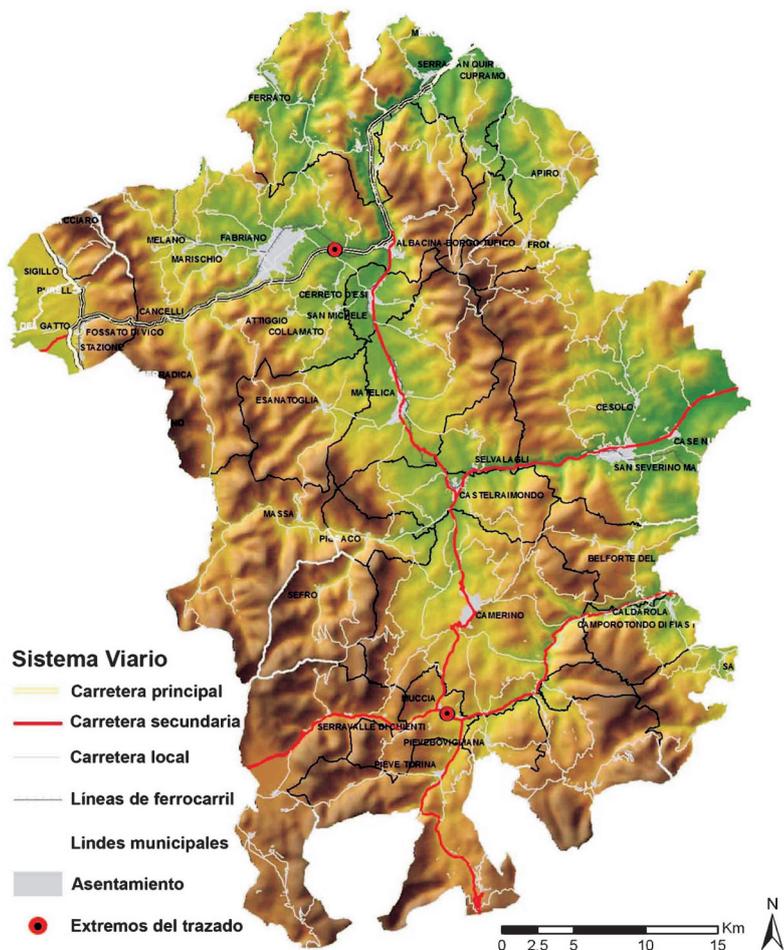
ISFTp = Índice de Sensibilidad por Fragmentación Territorial ponderado ($p=0,33$)

El ISG es capaz de valorar la propensión general del territorio a la construcción de nuevas obras de conexión viaria a través de una síntesis del conjunto de todas las informaciones consideradas. El ISG se calcula mediante la ponderación de los valores correspondientes a la fragmentación del territorio y de la sensibilidad territorial. De esta forma, mediante el ISG puede definirse, para cada uno de los ámbitos analizados, la conveniencia de introducir una nueva obra, atribuyéndoles el mayor grado de idoneidad a las áreas con una fragmentación más elevada y una menor calidad-sensibilidad territorial.

4. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para validar la metodología, los índices propuestos se aplicaron al área de estudio

3. Esquema resumen de la estructura reticular empleada para elaborar el proceso de análisis jerárquico.



4. Mapa marco del área de estudio.

en que se está llevando a cabo la construcción de una infraestructura de considerable interés para las conexiones transversales de Italia central.

El área identificada para la convalidación metodológica del trabajo de investigación es una zona apenínica de 1.573 km² aproximadamente, a caballo entre las regiones de Marcas y Umbría, afectada por un amplio plan de desarrollo de infraestructuras denominado "Proyecto Cuadrilátero Marcas-Umbría". El área comprende los perímetros administrativos de 25 Ayuntamientos situados en las provincias de Ancona, Macerata y Perugia.

Para esta área, la ley objetivo (L. de 21 de diciembre de 2001, nº 443) tiene prevista la realización de una serie de actuaciones viarias con el fin de mejorar las conexiones de la vertiente tirrénica con el interior umbromarquesano, y entre los principales ejes viarios longitudinales, representados por la autopista A-14 y la autovía E-45. El tramo de la Pedemontana Fabriano (AN) – Muccia (MC) en el que se centra la atención constituye el eje intermedio transversal que deberá unir las dos nuevas directrices de conexión.

El área que es objeto de estudio se caracteriza por dos franjas de colinas y montañas predominantemente cubiertas de bosques, con intervalos de valles en los que surgen los mayores núcleos urbanos de la zona, y en los que prevalecen formas de agricultura intensiva. La estructura de los asentamientos se presenta repartida uniformemente por todo el territorio, y cuenta con el soporte de una apretada red de carreteras de conexión local que constituyen también el principal factor de fragmentación del área en cuestión (Fig. 4).

La zona montañosa (7.955 ha) cuenta con la presencia del Parque Nacional de los Montes Sibilinos, así como de numerosas áreas naturales de especial interés (SIC y ZPS) que contribuyen a poner de manifiesto la especial importancia de este ámbito desde el punto de vista natural.

En el área de estudio se han calculado los valores de los índices que se habían puesto a punto. En lo que atañe al Índice de Sensibilidad Ecológica, éste resulta especialmente elevado en las áreas montañosas, que no fueron objeto de un marcado desarrollo ligado a las transformaciones debidas a los asentamientos y a la agricultura, permitiendo de esta forma la conservación de los valores de tipo ecológico originados por la presencia de áreas forestales, prados de las cumbres y demás usos del suelo de carácter natural. El paso a las cotas más bajas de las áreas de los valles mucho más antropizadas provoca una brusca reducción de los valores del índice, con una particular excepción que cabe achacar a la presencia de la vegetación ribereña a lo largo de la red hidrográfica que, con su peculiar configuración en espina de pez, siguiendo el desarrollo de las vertientes, atraviesa en sentido transversal las zonas llanas. La configuración de estas últimas áreas y su valor, visto en relación a la capacidad de conexión ecológica de un ámbito marcadamente transformado como el de las dos áreas de valle, debe convertirlos en objeto de especial atención, y, por tanto, de protección, tanto a la hora de introducir la obra en el territorio como durante la fase de proyecto.

El cálculo del Índice de Sensibilidad Morfológico-Estructural puso de manifiesto la existencia de áreas con una elevada propensión a la desestabilización así como de áreas con pendientes muy marcadas (índice ISMS alto) en las franjas montañosas.

El Índice de Sensibilidad Sociocultural pone de manifiesto la presencia de numerosas preexistencias históricas repartidas por el territorio en cuestión, que precisan oportunas actuaciones de tutela y valorización.

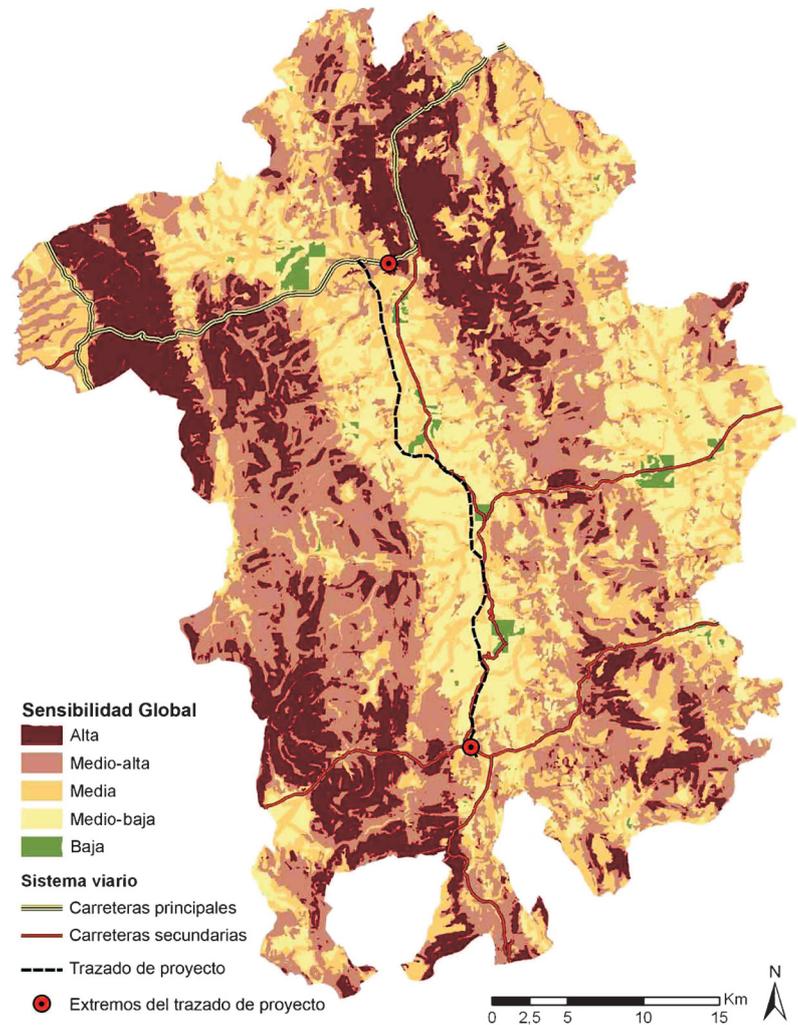
Desde el punto de vista de la demanda de comunicación local, se evidencia que la red de infraestructuras da una respuesta suficiente a las necesidades de conexión de los asentamientos, pero no responde de manera adecuada a las necesidades de conexión transversal que plantean los volúmenes de tráfico que transitan por la zona.

Los valores de los Índices de Fragmentación territorial provocada por las Infraestructuras y Asentamientos reagregados en el Índice de Sensibilidad a la Fragmentación Territorial subrayan el papel y el peso de ambas componentes en los fenómenos de corte de los ámbitos analizados. En este sentido, las infraestructuras asumen el mayor peso, tanto en términos de presencia en el territorio como en términos de continuidad del efecto barrera que causan. El peso combinado de ambos factores pone de manifiesto marcados problemas de fragmentación, repartidos de forma más bien homogénea por todo el ámbito analizado, con excepción de algunas zonas montañosas en las que la morfología, como ya hemos dicho, ha frenado el desarrollo de las actividades humanas y, por tanto, y de forma refleja, también los efectos negativos de las mismas.

A partir del cálculo de los índices de sensibilidad para los diferentes aspectos territoriales, a través de un proceso de agregación ponderada que le atribuyó un peso mayor a la componente ecológica dentro de la evaluación, se llegó a sintetizar un solo Índice de Sensibilidad Territorial (IST). El cálculo de dicho índice puso de manifiesto que la orografía influye claramente en las transformaciones del territorio.

En efecto, todas las áreas que resultaron aptas para la construcción de nuevas infraestructuras estaban situadas en zonas llanas, y eran áreas que ya habían sufrido fuertes procesos de transformación y presentaban situaciones ecológicas comprometidas. Estas áreas se caracterizan por un fuerte desarrollo de los asentamientos, por una mayor demanda de comunicación y por condiciones clivométricas y estructurales del suelo que facilitan los proyectos de las obras.

En el cálculo de la Sensibilidad Global a la introducción de una nueva infraestructura, a la hora de realizar el planteamiento metodológico se decidió que la mejor opción consistía en fragmentar aún más las áreas ya comprometidas, tutelando al máximo las áreas que todavía se conservaban. Por consiguiente, el valor más bajo del índice fue el que se obtuvo en las áreas ya afectadas por marcados procesos de antropización. Entre las áreas que presentan un elevado valor de Sensibilidad Global (ISG) (Fig. 5), las



más críticas son las que siguen un desarrollo lineal, ya que es de prever que tengan que intersectarse con nuevos trazados de proyecto. En estos casos, los puntos en que el índice disminuye ligeramente deberían indicar los pasos más convenientes, de alguna forma los más "sacrificables", para el paso de una nueva obra, a la vez que deberán ser objeto de especial atención y de las oportunas obras de mitigación a la hora de proyectar la obra.

La comparación entre el trazado de proyecto previsto para la carretera "Pedemontana Fabriano-Muccia" y los resultados del ISG permite ver su colocación en áreas con sensibilidad a la introducción medio-baja o media; las situaciones más críticas se observan en los puntos en que el trazado interfiere con la red hidrográfica menor. Para dichas situaciones, que representan unos pasillos ecológicos importantísimos para mantener la continuidad medioambiental del área, y que por su disposición no pueden evitarse al definir la mejor ubicación del trazado, habrá que prever actuaciones paliativas adecuadas.

5. Resultados del cálculo para el área de estudio del Índice de Sensibilidad Global (ISG).

5. CONCLUSIONES

El modelo de evaluación elaborado es el resultado de un proceso orientado a combinar, interpretar y transferir conocimientos de distintos ámbitos científicos, con el fin de abordar el problema de la sostenibilidad de las decisiones relacionadas con la planificación, poniendo de manifiesto toda la cadena causa-efecto. El principal punto fuerte del enfoque integral es su multidisciplinariedad, que ha permitido definir el objeto de estudio con amplitud y precisión, de forma compatible con los conocimientos disponibles, y reducir el grado de incertidumbre o, en cualquier caso, incorporarlo al análisis. El modelo constituye un soporte eficaz, tanto durante la fase de planificación estratégica como en la fase de proyecto de una obra infraestructural.

Su peculiar estructura modular convierte a este modelo en un instrumento flexible capaz de adaptarse a las más variadas condiciones de aplicación, tanto en términos de condiciones técnico-operativas ligadas a un proyecto infraestructural, como en términos de información disponible en el territorio.

Así, el trazado de un mapa general del territorio, analizado en términos de aptitud global para la introducción de un nuevo proyecto viario, puede convertirse en el soporte básico para identificar, a partir de la selección de las poblaciones a enlazar entre sí, un recorrido ideal y un pasillo más amplio de impacto reducido dentro del que los técnicos puedan definir previsiones operativas adecuadas, no sólo desde un punto de vista técnico y de proyecto, sino también de la sostenibilidad global de la obra.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Fiacchini, D., *Infrastrutture viarie e fauna selvatica*. Estimo e Territorio (2002).
- (2) Blasi, C., *L'analisi della connettività e della frammentazione nella definizione dei corridoi ecologici in ambiente urbano e perturbano*, ANPA, Università di Catania, Reti e corridoi ecologici per gli interventi di conservazione e salvaguardia della natura in ambiente urbano e suburbano (1-3 ottobre 1999).
- (3) Spellerberg, I. F. *Shannon–Wiener Index*, Encyclopedia of Ecology, 2008, Pages 3249-3252.
- (4) Somerfield, P. J. Clarke, K. R., Warwick, R. M. *Simpson index*, Encyclopedia of Ecology, 2008, Pages 3252-3255;
- (5) Death, R. *Margalef index*, Encyclopedia of Ecology, 2008, Pages 2209-2210.
- (6) John, E. Hasse, Richard, G. Lathrop., *Land resource impact indicators of urban sprawl*, *Applied Geography*, Volume 23, Issues 2-3, April-July 2003, Pages 159-175.
- (8) Guigou, J. L., *Méthodes Multidimensionnelles*, Dunod, (1977).
- (9) Jacquet-Lagrez, E., *Methodes de decision multicritere*, Hommes et techniques, Boulogne-Billancourt (1983).
- (10) Roy, B., *Multicriteria Methodology for Decision Analysis*, Academic, Kluwer (1996).
- (11) Candura, A., Dal Sasso P., Marinelli G., *Analisi multicriteri e gis per la facilitazione delle scelte di pianificazione*, Atti IX convegno nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria Ischia Porto, (12-16 settembre 2009).
- (12) Di Fazio, S., Barreca, F., Modica, G., *A GIS-based decision support system for the sustainable management of grazing in protected areas*. In: Proceedings of the CIGR 2nd Technical Section International Seminar on "New Trends In Farm Buildings", Évora, Portugal, (02-06 maggio 2004).
- (13) A.A.V.V., *Pianificazione e Reti Ecologiche PLANECO – Planning in Ecological Network*, Cangemi Editore, Roma (2003);
- (14) Boitani, L. et al., *Rete Ecologica Nazionale – Un'approccio alla conservazione dei vertebrati italiani - Relazione Finale*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, (2002).
- (15) Casermeiro, M. A. et al., *A model for assessing habitat fragmentation caused by new infrastructures in extensive territories – Evaluation of the impact of the Spanish strategic infrastructure and transport plan*, *Journal of Environmental Management*, 2010.
- (16) Otero Pastor, I., *Environmental screening tools for assessment of infrastructure plans based on biodiversity preservation and global warming (PEIT, Spain)*, *Environmental Impact Assessment Review*, 2009.
- (17) Geneletti, D., *Using spatial indicators and value functions to assess ecosystem fragmentation caused by linear infrastructures*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 5, Issue 1, February 2004, Pages 1-15.
- (18) Saaty, T. L., *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. In: *The Analytic Hierarchy Process Series: Volume I*, RWS Publications, Pittsburgh, PA (1990).
- (19) Guccione, M., Gori, M., Bajo, N.(a cura di), *Tutela della connettività ecologica del territorio e infrastrutture lineari (rapporto tecnico)*, ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma (2008).
- (20) Regione Umbria, "Convenzione Per la realizzazione del "Progetto Rete Ecologica Regione Umbria – RERU, Relazione Finale", Perugia (2004).
- (21) Saaty, T. L., *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. In: *The Analytic Hierarchy Process Series: Volume I*, RWS Publications, Pittsburgh, PA (1990).
- (22) Kwak, N.K., Lee, C., *Amulticriteria decision-making approach to university resource allocations and information infrastructure planning*, *European Journal of Operational Research*, Volume 110, Issue 2, 16 October 1998, Pages 234-242.

* * *