

Los SIG en el análisis y gestión del medio ambiente

EMILIO CHUVIECO
JAVIER SALAS

La creciente relevancia de los estudios medioambientales es una clara consecuencia del interés que estos temas suscitan en la opinión pública. El modelo de desarrollo económico que se ha implantado en Occidente, considera, cada vez con mayor importancia, el equilibrio con las condiciones del entorno.

Ahora bien, para que este equilibrio sea posible, resulta preciso multiplicar nuestros esfuerzos para un mejor conocimiento y gestión de ese medio ambiente, desde los espacios naturales, propiamente dichos, hasta las zonas ya intensamente humanizadas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una de las herramientas más idóneas para facilitar ese mejor conocimiento y gestión. Gracias a su capacidad para integrar información espacial de muy diversas fuentes, permiten generar modelos, simular escenarios y prever consecuencias de determinadas decisiones de planificación.

Es importante anotar, ya desde estos primeros párrafos, que los SIG no proporcionan en sí mismos una nueva información: son únicamente gestores de la información que se genera por otras técnicas y de fuentes muy variadas: estaciones meteorológicas, censos agrarios, imágenes de satélite o fotografías aéreas, perfiles edáficos, etc. En consecuencia, la calidad de las aplicaciones que se aborden con un SIG dependerá

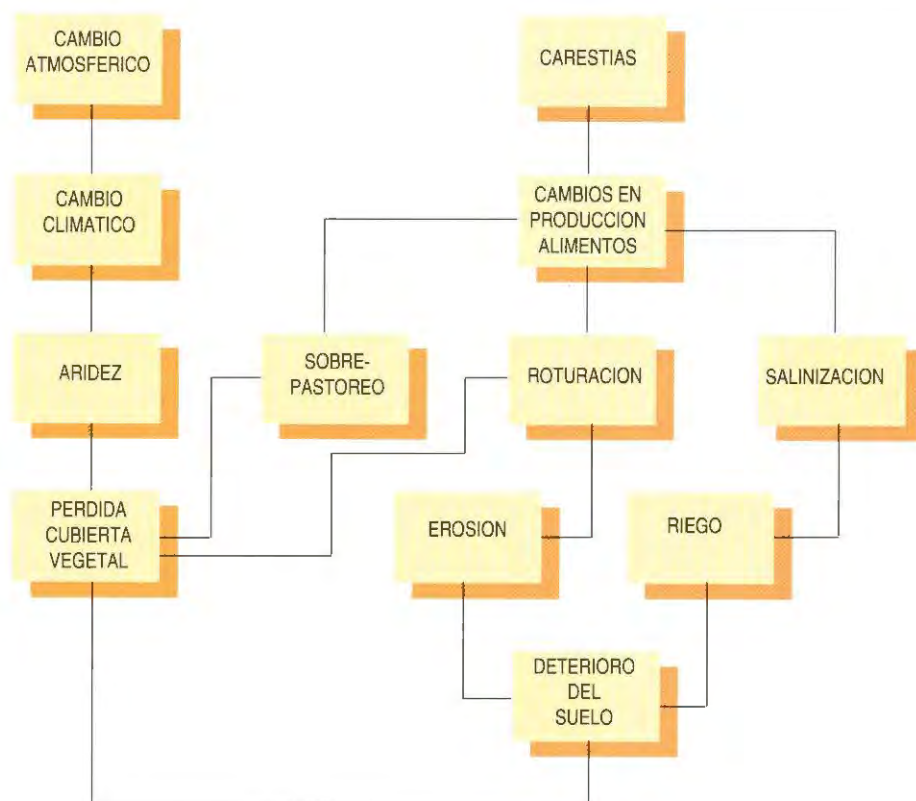
de la calidad y actualización de la información disponible en el sistema. ¿Qué aporta, entonces, un SIG? Básicamente, a nuestro juicio, la capacidad de gestionar e integrar información de múltiples orígenes, permitiendo análisis que resultarían, en la práctica, inasequibles para los métodos convencionales. Pongamos un sencillo ejemplo. Si se aborda un estudio para señalar el trazado óptimo de una carretera, han de considerarse aspectos muy variados como la topografía del área, su uso del suelo, la propiedad, la litología, la protección de cuencas, etc. Todas estas variables pueden manipularse por métodos tradicionales, por ejemplo mediante superposición manual, pero la complejidad de las sucesivas composiciones puede obligar a simplificar en exceso el problema, eligiendo una solución que diste de la más idónea. Con un SIG, este trazado puede automatizarse a partir de unos criterios definidos por los expertos, mostrándose diversas alternativas, que sean evaluadas, a su vez, tanto económica como ambientalmente. En definitiva, el paisaje es un compuesto de múltiples factores, ya sean referidos al medio físico, ya a la actividad humana, que es preciso considerar para una gestión integral del territorio. En ese enfoque global es donde los SIG evidencian su gran interés para este tipo de estudios.

Ahora bien, al introducir el término global estamos haciendo referencia, asimismo, a la dimensión planetaria de los

sucesos medioambientales. A nadie se escapa la importancia de problemas de ámbito global, como la desertificación, el deterioro de la capa de ozono o la lluvia ácida, que exceden notablemente las fronteras nacionales. También en este terreno, los SIG facilitan la integración de datos procedentes de diversas fuentes, permitiendo generar una imagen global de nuestro planeta.

Tomemos como modelo a los procesos de desertificación, de especial relevancia en nuestro país, el más afectado de la Comunidad Europea por este problema. Cuando hablamos de este fenómeno hacemos mención, a la vez, a un proceso natural y humano. Por un lado, estamos refiriéndonos a una consecuencia de condiciones climáticas inestables, en zonas semiáridas. Por otro, aludimos a un proceso de deterioro ambiental causado directamente por el hombre, al realizar una gestión inadecuada de estos espacios frágiles. En conjunto, se estima en unos 60.000 km² los perdidos anualmente por procesos de desertificación, y en unos 30.000.000 km² los potencialmente afectables por este proceso (Kemp, 1990). Junto a los factores naturales (cambio climático), las causas de desertificación se relacionan estrechamente con unas prácticas agrarias inapropiadas (gráfico 1): sobrepastoreo, deforestación, roturación de tierras marginales, regadíos no controlados, etc. que causan la erosión del componente más vital del suelo, o su

Gráfico 1
Esquema de los factores que intervienen en los procesos de desertificación



salinización, y una pérdida, a veces irreversible, del sustrato vegetal.

Como es lógico, estas acciones están relacionadas con una situación demográfica delicada, debida a un período de mayor sequía, a un crecimiento de la población o a una situación de conflicto bélico —que provoca migraciones incontroladas y catastróficas carestías, como ha ocurrido en los últimos años en el Africa Occidental—, por lo que el componente humano debe estar presente en el estudio de los procesos globales.

En resumen, la desertificación es un fenómeno que afecta a un vasto territorio, más allá de cualquier frontera nacional, y que está originado por la con-

junción de muy variados aspectos humanos y medioambientales. Es evidente, en este caso, que el término proceso global no sólo se refiere al volumen del territorio abarcado, sino también a las disciplinas implicadas en el problema. En el mismo sentido cabría expresarse en relación con otros procesos de gran importancia medioambiental, como la deforestación del bosque ecuatorial (Myers, 1991), la lluvia ácida, el efecto invernadero o el deterioro de la capa de ozono (Unninayar, 1988; Kemp, 1990). En todos ellos, se muestra la conjunción de aspectos físicos (química atmosférica, oceanografía, climatología, fisiología vegetal...), y humanos (población, con-

sumo, tecnología, aspiraciones...: Moss, 1992), que actúan sobre un vasto territorio.

En este artículo, vamos a comentar algunos campos de interés medioambiental en donde la aplicación de los SIG resulta especialmente fructífera. De acuerdo al esquema aquí enunciado, introduciremos una división entre los enfoques globales y los locales, comentando en ambos casos algunos ejemplos de SIG ya operativos.

SIG de ámbito global (1)

Como antes indicamos, el estudio de los procesos globales implica dos dimensiones de gran trascendencia en el diseño de base de datos. Por un lado, se trata de trabajos que cubren un amplio espectro de variables. Por otro, abarcan vastos territorios, desde la escala continental hasta la planetaria. Estas dos características, implican algunas particularidades de estas bases de datos en relación con las locales. Entre los aspectos a considerar, pueden citarse los referentes al volumen de información, su estructuración y gestión, documentación y manejo de errores (Peuquet, 1988; Mounsey, 1991).

Variables de interés para estudios globales

Sería muy prolijo hacer una enumeración pormenorizada de las variables de interés para el estudio de procesos globales. La gran cantidad de proyectos en marcha, sobre muy diversos campos, dificulta compilar una relación muy meticulosa. No obstante, podemos hacer una lista sucinta de estas variables agrupadas en distintos ámbitos (Unninayar, 1988; Walker, 1990):

- Geosfera: rotación terrestre, cambios altitudinales, interacción centro-corteza, movimiento de placas, vulcanismo, fluctuaciones geomagnéticas.

(1) En este epígrafe se toman algunos párrafos de la ponencia presentada al V Coloquio de Geografía Cuantitativa (Chuvienco, 1992).

- Océano: temperatura de la superficie, salinidad a distintas profundidades, altura del oleaje, biomasa oceánica.
- Criósfera: cobertura de nieve, hielo oceánico, grosor, movimiento de la corteza de hielo y glaciales.
- Superficie terrestre: ciclo hidrológico (evaporación, evapotranspiración, precipitación, escorrentía, almacenamiento), temperatura del suelo, humedad, cobertura vegetal, tipo de suelo, profundidad, nutrientes, erosión, mineralización.
- Radiación: balance en superficie y en el techo de la atmósfera, albedo, emisión, gradientes Ecuador-Polo, constante solar, flujo ultravioleta.
- Composición atmosférica: concentración y distribución de C_2 , fluorocarbonos, ozono, aerosoles.
- Estructura de la atmósfera: viento, temperatura, humedad, presión, comportamiento del jet-stream a distintas alturas.
- Población: crecimiento, migraciones, utilización del suelo, sanidad, indicadores económicos, tecnología.

Requerimientos para una SIG de aplicación global

Entre las particularidades de las bases de datos globales destaca, en primer lugar, el volumen de información que precisan almacenar. Además de abarcar un amplio número de variables, éstas deben referirse a vastos territorios, lo que implica gestionar grandes masas de datos. Por ejemplo, si se pretendiera realizar un inventario mundial con imágenes SPOT pancromático (resolución de 100 m² y un solo canal), se requeriría un almacenamiento equivalente a $1,5 \times 10^{12}$ bytes (1.389 Gigabytes), lo que resulta inabordable con la tecnología actual. Aun si disminuyéramos la resolución espacial a 1 km², todavía se necesitarían 142,22 Megabytes para albergar cada una de las variables a introducir en el sistema. Obviamente, resulta obligado acudir a estructuras de almacenamiento compactas, que permitan reducir estos volúmenes a niveles más maneja-

bles. Algunas propuestas subrayan la conveniencia de las estructuras vectoriales, para cartografía temática, y árboles cuaternarios (*quadrees*) para mallas regulares (Tobler y Chen, 1986; Peuquet, 1988). Asimismo, se aboga por teselas de menor resolución, entre 10.000 y 100 km², según las variables. Las reducciones en los precios y las mejoras tecnológicas en los sistemas de almacenamiento (singularmente los discos ópticos), pueden facilitar en el futuro mejores resoluciones.

Otro aspecto a tener en cuenta es la coherencia, tanto temática como geométrica, en la información que se ingresa a este tipo de bases de datos. En el caso de la cartografía temática, por ejemplo, al tratarse de datos provenientes de distintas agencias y/o países, es frecuente detectar inconsistencias en la definición de las categorías o los criterios de compilación. Por ejemplo, en el desarrollo del proyecto CORINE —que luego comentaremos— Mounsey (1991) anota la falta de univocidad de criterios en los países de la CEE para definir algo tan aparentemente trivial como la temperatura mensual media, lo que dificulta la fusión entre los datos meteorológicos provenientes de los distintos países.

En esta misma línea cabe hablar en lo que se refiere al ajuste geométrico entre áreas fronterizas. Pese a que la proyección UTM se haya estandarizado en la mayor parte de los países, todavía persisten problemas de solape entre cartografías nacionales (diferentes escalas, normas de elaboración cartográfica, etc.). En muchas ocasiones es preciso obtener una cartografía global a partir de la generalización cartográfica, lo que lleva a frecuentes errores de interpretación por la subjetividad del proceso (Rhind y Clark, 1988). De igual modo, son muy dispares las fechas de referencia y la actualización de la cartografía disponible. A ello hay que añadir la escasa disponibilidad de cartografía digital, y la falta de estándares en formatos de intercambio de la información. Por estas razones, varios intentos de carto-

grafía global han partido de una sola fuente de referencia en lugar de intentar conjuntar cartografías nacionales. Por ejemplo, el proyecto impulsado por la Asociación Cartográfica Internacional para generar un mapa base para estudios globales, ha seleccionado como fuente más idónea el ONC (*Operational Navigational Charts*), a escala 1:1.000.000, compilado por el U.S. Defense Mapping Agency (Clark et al, 1991).

En cuanto a la estructuración de la base de datos, resulta obligado considerar que se trata de información vital para un amplio abanico de científicos. En consecuencia, se debe enfatizar la facilidad de acceso (por redes o en soporte digital), la interconexión entre las distintas variables, su rápida actualización, y una buena documentación de sus contenidos (Mounsey, 1991). De estas consideraciones se derivará, en gran parte, el éxito del diseño y la utilidad del esfuerzo, teniendo siempre en cuenta que «la forma en la que sean almacenadas e integradas las distintas observaciones sobre la superficie terrestre determinará nuestro grado de entendimiento de los procesos globales» (Tomlinson, 1988, p. 1).

Respecto a las fuentes de información para este tipo de bases de datos, el recurso a las imágenes de satélite resulta fundamental, gracias a la repetitividad y la cobertura global que proporcionan. Teniendo en cuenta esos objetivos globales, los sensores más utilizados en este tipo de aplicaciones son los de observación meteorológica, principalmente los instalados en los satélites GOES, Meteosat, Nimbus, NOAA, Seasat y ERS. El rango de aplicaciones es muy variado, desde la medición de la temperatura y composición del agua del mar (Tameishi, 1991), hasta el seguimiento de cosechas (Teng, 1990), los estudios de deforestación tropical (Nelson et al, 1987; Batista y Tucker, 1991), la estimación de cobertura de nieve (Ferris y Congalton, 1989) o la detección de incendios forestales (Matson y Holben, 1987(Figura 1).

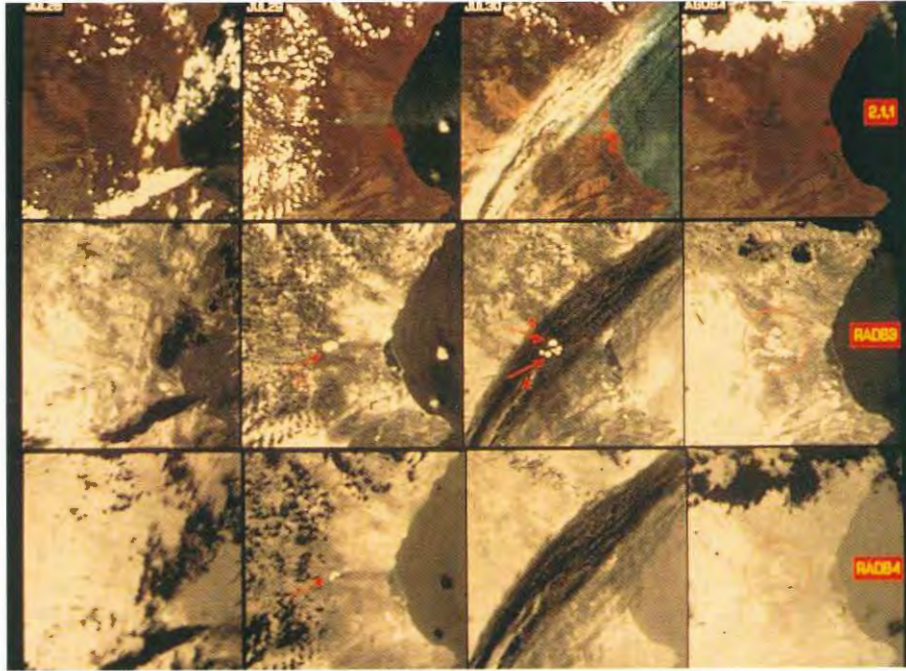


Figura 1: Evolución del incendio ocurrido en la Hoya de Buñol (Valencia), en 1991 a partir de imágenes NOAA. En la parte superior se sitúa una composición en falso color correspondiente a los días 28, 29 y 30 de julio, y 4 de agosto. En la parte inferior los canales correspondientes al infrarrojo medio y térmico. En las dos fechas intermedias el fuego estaba activo, siendo especialmente evidente en el infrarrojo medio (serie central), como consecuencia de la mayor sensibilidad de esta banda del espectro a las altas temperaturas.

Algunos ejemplos de SIG globales El programa GRID

El *Global Resources Information Database* (GRID) es un proyecto dependiente del programa medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP/GEMS). Fue iniciado en 1985 con dos centros, en Ginebra y Nairobi, a los que se unió en 1988 el de Bangkok y, posteriormente, otros asociados en Noruega, USA, Japón, Polonia y Nepal (Mooneyhan, 1991). Pretende coordinar una red global de bases de datos medioambientales con tres objetivos:

- 1) Proporcionar la información más actualizada, tanto global como regional, a científicos y gobiernos.
- 2) Facilitar el acceso a modernos equipos a los científicos y gestores del medioambiente en países donde no están disponibles; y
- 3) Proporcionar entrenamiento en tecnología de gestión de datos espaciales

para personas de países en desarrollo.

Propiamente el programa GRID no genera datos. Su función es coordinar el trabajo de otras agencias temáticas de la ONU, como la FAO o la UNESCO, o con otras instituciones internacionales (IC-SU-IGBP, UNITAR, Organización Meteorológica Mundial, Centros Mundiales de Datos, NASA, etc.). Esto le ha permitido ir acopiando una serie de variables temáticas, de ámbito mundial o continental. Hasta 1988, disponía de los siguientes datos globales (Mooneyhan, 1988): fronteras, elevaciones, suelos, vegetación, intensidad del cultivo, índice de vegetación, anomalías en la precipitación y la temperatura, distribución de la capa de ozono, y temperatura superficial del mar, a distintas escalas y proyecciones, aunque domina la referenciación geográfica (latitud-longitud). El programa GRID ha seleccionado el continente africano para compilar

una base de datos más detallada, que incluye vegetación, cuencas hidrográficas, precipitación, viento, áreas protegidas, provincias biogeográficas y especies.

Además de la generación de bases de datos, el programa GRID también ha realizado diversos proyectos internacionales de orientación ambiental, como han sido los dedicados a planificación de cultivos, detección de áreas con epidemias o el seguimiento de las variaciones en el nivel del mar (Mooneyham, 1991).

Bases de datos temáticas

Junto a las iniciativas incluidas en el programa GRID, existen numerosas agencias que trabajan en el desarrollo de bases de datos globales para sus fines específicos. Este es el caso de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), que cuenta con una red para coordinar los datos disponibles sobre el clima, incluyendo imágenes de satélite (geoestacionarios, como el Meteosat, y de órbita polar, como el NOAA), estaciones terrestres, aéreas, datos de radar, sondeos atmosféricos, datos mareales y sobre la capa de ozono. Entre sus proyectos figura la realización de mapas de la temperatura superficial del mar, para áreas de 200 x 200 km de precipitación, balances de radiación y polución del aire (Boldirev, 1988).

Otras organizaciones que elaboran datos de escala global son la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo (ISSS), la Asociación Cartográfica Internacional (ICA), la Unión Geográfica Internacional (IGU) y el programa sobre medio ambiente SCOPE (Clark et al, 1991) (2).

Asimismo, diversas agencias del gobierno norteamericano elaboran bases

(2) En diversos artículos del libro editado por H. Mounsey (1988) se recogen experiencias sobre el diseño de bases de datos globales por diversas instituciones nacionales e internacionales.

de datos globales, como es el caso de la NOAA, a través de sus centros meteorológicos y del Centro Nacional Geofísico (NGDC). Este último, genera abundantes datos sobre sismología, geomagnetismo, glaciología, así como modelos digitales del terreno para el conjunto del globo (figura 2). La agencia espacial NASA está perfilando un ambicioso plan para la obtención de múltiples datos sobre el conjunto del planeta. Es el denominado *Mission to Planet Earth*, que incluye un sistema de observación terrestre (EOS), formado por cuatro estaciones polares, una red de satélites de apoyo, una carga científica auxiliar y una serie de satélites geoestacionales (Asrar, 1990). Estos datos se calibrarán sobre el terreno mediante una infraestructura apropiada para la toma de datos in situ, y se conectarán con una base de datos suficientemente potente para diseñar modelos explicativos. La pieza clave de este proyecto es el programa EOS, que permitirá crear un sistema de observación espacial integrado para abordar un estudio multidisciplinar de los paisajes terrestres. Se pretende adquirir una serie continuada y global de datos, para el apoyo a las investigaciones sobre cambio global.

El programa CORINE

Dentro de las bases de datos globales en desarrollo, nos interesa especialmente analizar la coordinada por la Dirección General de Medio Ambiente de la CEE. Denominada CORINE (*Coordination, Information and Environment*), este programa arranca en junio de 1985 con el propósito de «recopilar, coordinar y asegurar la consistencia de información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales» (Mounsey, 1991) en el ámbito de la Comunidad Europea. Los principios que guiaron el desarrollo de esta base de datos fueron: (i) respetar al máximo los datos no elaborados, para que el usuario pudiera elegir las transformaciones más convenientes a cada fin; (ii) emplear los datos disponibles, cuando

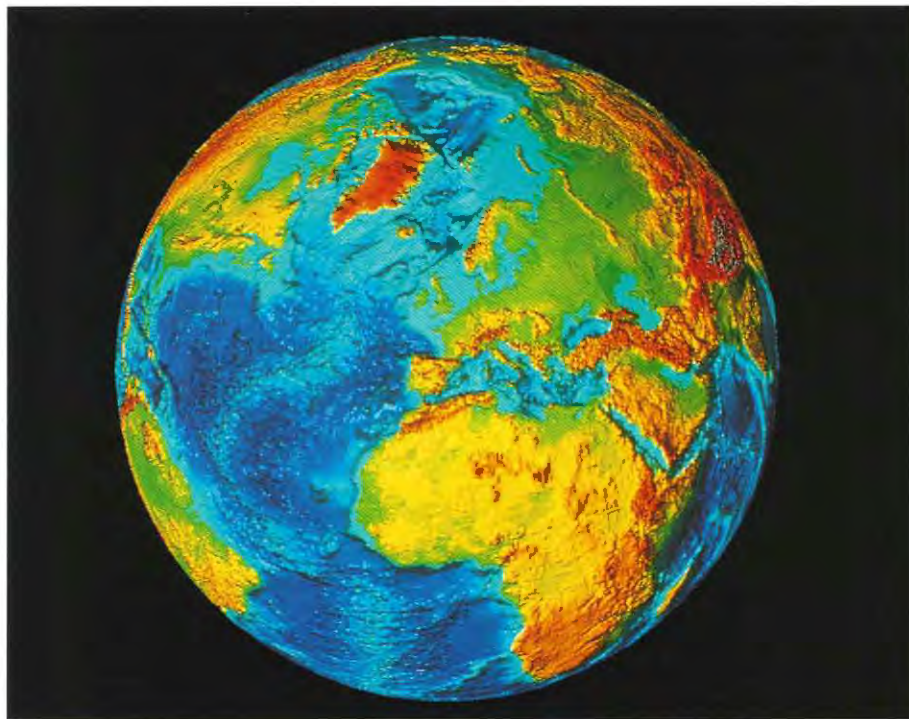


Figura 2: Imagen generada a partir del modelo digital del terreno del National Geophysical Data Center. Los tonos de color indican gradación altitudinal.

fuera posible, en lugar de realizar nuevos inventarios; (iii) orientar la base hacia una escala media (1:250.000), para facilitar la integración entre los distintos países; (iv) iniciar el desarrollo a partir de datos digitales ya existentes, para obviar los costes de las tareas de digitalización.

Tras cinco años de trabajo, en 1990, se disponía ya de una sustancial colección de variables medioambientales, a escalas comprendidas entre 1:100.000 y 1:3.000.000, siendo dominante la escala 1:1.000.000. Las variables más significativas de la base de datos son las derivadas, como es el caso del riesgo de erosión, compilado a 1:1.000.000, que requiere 4.000 Mb para su almacenamiento. También se encuentran operativos en la base de datos la cartografía de biotopos, recursos hídricos, erosión costera, vegetación potencial, tipos de suelos, elevaciones y pendientes, áreas administrativas, tráfico aéreo, estaciones nucleares, así

como datos climáticos y socioeconómicos (Mounsey, 1991). De especial relieve resulta el proyecto CORINE-Land Cover, que pretende cartografiar la ocupación del suelo de Europa a escala 1:100.000 cada 5 años. Este trabajo se basa en la interpretación de ortoimágenes de satélite a la misma escala, y posterior digitalización de los recintos de cobertura (López-Vizoso, 1989). La leyenda, bastante detallada, permitirá utilizar este producto como herramienta clave en la gestión territorial.

SIG de ámbito local

Lógicamente, junto a estos SIG de orientación global, existen múltiples ejemplos de aplicaciones al ámbito regional y local. Aquí, los requerimientos en cuanto a volumen de información suelen ser menos exigentes, siendo ahora protagonista la calidad y actualización de los datos introducidos al siste-

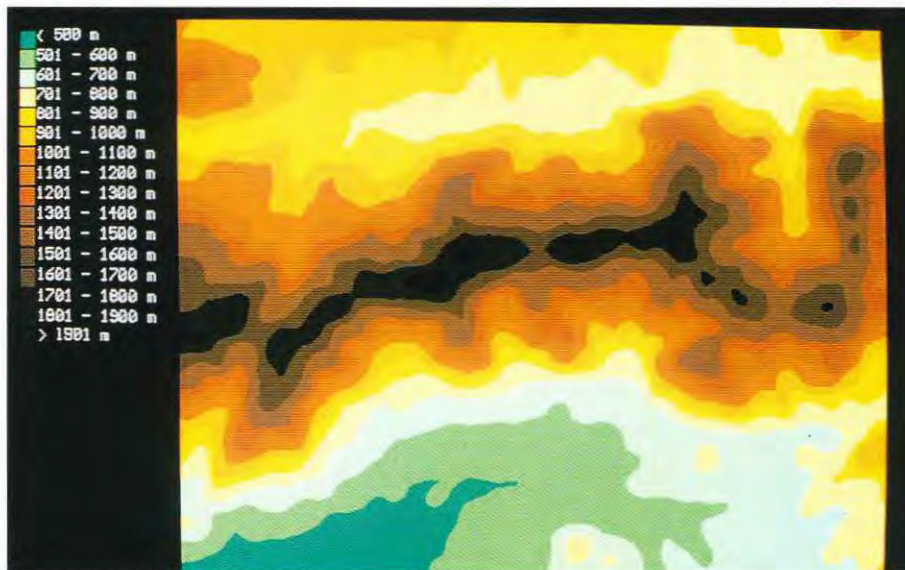


Figura 3: Modelo digital del terreno correspondiente al sector más oriental de la Sierra de Gredos

ma. Estos datos son originados por fuentes muy variadas, como la aerofotogrametría, la teledetección espacial o los inventarios estadísticos.

Existen ya algunos ejemplos en nuestro país de SIG de ámbito regional. Tal vez uno de los más avanzados sea el desarrollado por la Junta de Andalucía, denominado SINAMBA, que incluye las siguientes variables: información socioeconómica, topografía, uso del suelo y vegetación, suelos, clima, emisión de contaminantes, residuos tóxicos y peligrosos, agua, y ortoimágenes espaciales (Moreira y Giménez, 1993). Entre las aplicaciones que han desarrollado a partir de esta base de datos figuran la evaluación de la dinámica litoral, la detección de contaminación industrial en la costa, análisis de la sobre-explotación de acuíferos, evaluación del riesgo de erosión, efectos de los incendios forestales y capacidad de uso agrícola y forestal de la tierra.

Esto es sólo un ejemplo de los múltiples SIG de ámbito regional y local disponibles en nuestro país. Su grado de desarrollo es muy variado, primando

los que se encuentran en fase de diseño y acopio de datos, siendo los plenamente operativos aún escasos. Por esta razón, nos parece más oportuno que comentar la variedad de los sistemas existentes, detenernos en algunos ejemplos temáticos, en donde el recurso a un SIG puede resultar clave. Hemos escogido, entre las posibles variables de interés medioambiental, los referidos a datos climáticos y a previsión de incendios forestales, temas en los que hemos desarrollado algunos proyectos en los últimos años.

Los SIG en el análisis de clima

Parece innecesario hacer hincapié en la importancia que las variables climáticas desempeñan en la mayor parte de los procesos físicos y biológicos, condicionando notablemente el medio ambiente y, en consecuencia, las actividades humanas. Como es bien sabido, en nuestro país sólo poseemos datos climáticos en localizaciones puntuales (estaciones meteorológicas), distribui-

das de forma dispersa a lo largo de nuestra geografía. Los principales vacíos de información se dan, precisamente, en las zonas de mayor interés ambiental, como es el caso de aquéllas con topografía compleja, en donde la extrapolación de los valores climáticos resulta bastante compleja.

Como consecuencia, la estimación de variables climáticas precisa del apoyo de variables auxiliares, como son la topografía (altitud, orientación, pendiente), localización geográfica (latitud, longitud, distancia), cobertura vegetal, y distribución temporal, ligadas a cada variable por relaciones que pueden estimarse para unos puntos muestrales, extendiendo luego tal relación al conjunto del territorio. Estas variables auxiliares pueden incorporarse a un SIG, por lo que esta herramienta resulta idónea para estimar datos climáticos en áreas sobre las que no existen estaciones meteorológicas.

Lógicamente, tales estimaciones parten de las mediciones realizadas por las estaciones meteorológicas, que pueden situarse a más o menos distancia de los puntos que pretenden estimarse, aunque, por lo general, se localizarán en zonas más bajas y de menor pendiente, como corresponde al emplazamiento habitual de los centros poblados. El empleo de estaciones automáticas puede solventar este problema en el futuro; mientras tanto, resulta necesario plantear algún método que permita extender al conjunto del territorio las variables medidas en cada estación.

La estimación de datos climáticos para zonas sin observatorios meteorológicos puede llevarse a cabo mediante varias técnicas de interpolación, es decir, mediante una serie de procedimientos que permiten estimar el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral) a partir de los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (observatorios meteorológicos, en nuestro caso). Estas técnicas pueden ser agrupadas en métodos de interpolación espacial y métodos de interpola-

ción mediante funciones de regresión.

Los métodos de interpolación espacial, en función del mecanismo matemático que utilizan, pueden ser divididos en directos y analíticos (Bosque, 1992). Los primeros formulan unas suposiciones generales sobre el carácter general de la superficie a interpolar y en función de ellas establecen la función matemática de interpolación. En los analíticos se estudia, en una primera fase, el carácter de la autocorrelación espacial de la variable a interpolar, usando para ello los puntos muestrales. A partir de esta información generan, en la fase de cálculo, una función de interpolación que tiene en cuenta el grado y tipo de autocorrelación existente en esa variable.

Entre los métodos directos, la generación de polígonos de Thiessen es una de las técnicas de interpolación espacial de variables climáticas más conocida. Se trata de delimitar los polígonos que definen el área de dominio de cada estación meteorológica; esto es, el territorio para el que esa estación sea la más próxima. Una vez delimitada esa superficie se admite que cada estación representa la precipitación media del polígono en que se encuentra.

Esta metodología ha sido aplicada al cálculo de la precipitación en la cuenca del río Sil, mostrando unos resultados satisfactorios (Polo et al, 1981). Su principal inconveniente es considerar un territorio como isotrópico, lo cual es poco aplicable a zonas montañosas, especialmente si la densidad de la red de estaciones meteorológicas es pequeña. No obstante, puede ofrecer buenos resultados si la densidad de la red meteorológica es alta y su ubicación adecuada.

Un segundo método de interpolación directa es el de las medias móviles con ponderación por la distancia. Este método supone que en cada punto a estimar son los observatorios meteorológicos más próximos los que tienen valores más parecidos y, además, que esta semejanza disminuye con la distancia entre el punto a estimar y el observato-

rio. Entre las diversas posibilidades para establecer el factor de ponderación puede optarse por la inversa a la distancia o la distancia al cuadrado, si los contrastes espaciales son bruscos. Este método se utilizó sobre un área montañosa del Sistema Central, con unos resultados que validan su uso para la generación de mapas de isoyetas en zonas de topografía compleja (Fernández y Moreno, 1981). No obstante, presenta el mismo problema que el método de Thiessen para zonas montañosas, siendo válido únicamente cuando la red meteorológica es densa y está bien localizada. Su principal ventaja, con respecto al método anterior, es la representación de una superficie continua frente a una red de polígonos, más alejada de la realidad.

Los métodos analíticos de interpolación espacial tienen en cuenta la propia variación espacial de la variable; esto es, su modelo de distribución en el espacio. El más conocido es el denominado *krigeage*, que realiza la estimación de puntos desconocidos a partir del cálculo del semivariograma (variación de la varianza con la distancia). Los valores interpolados se obtienen mediante una combinación lineal ponderada de los valores de la variable (temperatura o precipitación) en los observatorios meteorológicos. Por ello, en cierto modo, se trata de una variante del método de las medias móviles, que se diferencia por la forma en que se obtienen las ponderaciones. En un estudio sobre las precipitaciones en la Cuenca del Wadi Kadjemeur, en el Chad oriental, se obtuvieron, mediante interpolación por *krigeage*, mapas de isoyetas de excelente bondad de ajuste (Delfiner y Delhomme, 1975).

Un segundo grupo de técnicas de interpolación se apoya en el uso de variables auxiliares, mediante el cálculo de alguna función de regresión. En otras palabras, se trata de ecuaciones que relacionen las variables climáticas que pretenden estimarse con otras sobre las que conozcamos su distribución espa-

cial (altitud, orientación, latitud, etc.). Estas últimas servirían como soporte espacial para la estimación de esas variables climáticas, en puntos en donde no existan observatorios.

Los ejemplos de este tipo de trabajos son muy abundantes. Los más habituales han relacionado la temperatura o precipitación con la altitud del lugar, supuesto acorde con los estudios de la Organización Meteorológica Mundial (Muñoz, 1979-80). Aunque existen varios procedimientos para abordar este análisis, una premisa clave a la hora de realizar las rectas de regresión es el establecimiento de zonas climáticas homogéneas (Taylor y Waite, 1980).

En el trabajo de Muñoz (1979-1980) se hace una recopilación de los diversos métodos utilizados para calcular los datos de temperatura en cualquier punto de un área homogénea, a partir de la altitud mediante rectas de regresión, gradientes y otros procedimientos. Aunque los resultados obtenidos con los métodos propuestos pueden llegar a ser bastante precisos, en este estudio se apunta el hecho de no tener en cuenta si los observatorios están situados en solana o en umbría, con lo que la variación posible que introduce la mayor o menor exposición a la radiación solar puede ser considerable. Esta metodología resulta inadecuada para zonas geográficas heterogéneas, para las que se recomienda una división en subáreas más homogéneas. Para el caso concreto del Valle del Lozoya se obtuvieron coeficientes de correlación elevados, entre 0,34 para febrero y 0,98 para agosto, estando siempre por encima de 0,6, a excepción del citado mes de febrero; los mejores ajustes se obtienen para los meses de julio a enero. Los errores entre los valores calculados y observados oscilan entre 0 y 1,1°C (0 y 20%), no obstante, solamente utilizan cuatro estaciones para hacer las rectas de regresión, por lo que los datos pueden no ser muy fiables (Muñoz, 1979-1980). Valores similares se obtuvieron para una zona de Nuevo México (Campbell, 1972),

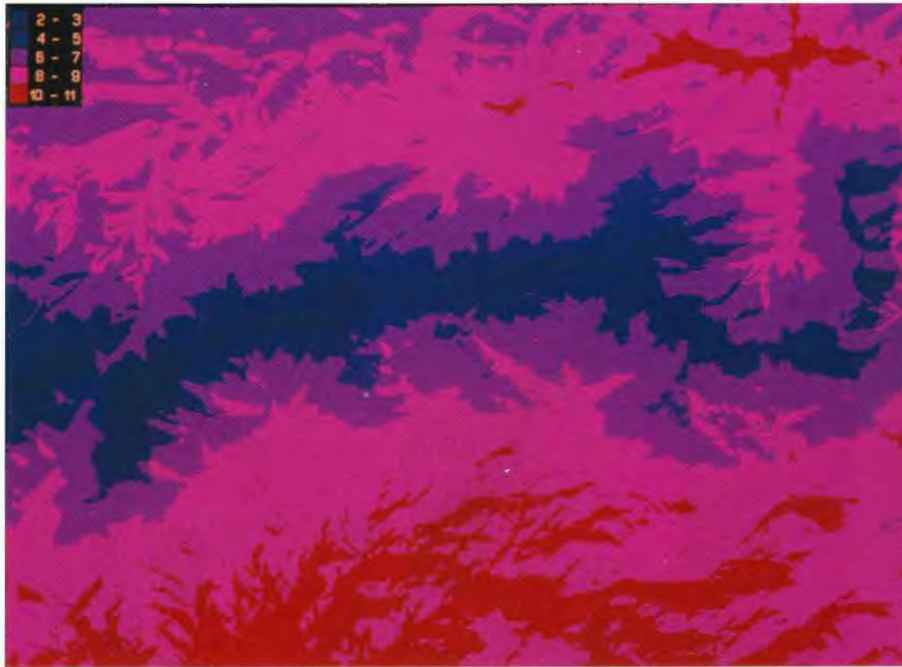


Figura 4: Mapa de las temperaturas mínimas anuales generado a partir de una regresión sobre los datos del modelo digital del terreno

aplicando una regresión simple entre altitud y temperatura. Los resultados de este experimento ofrecían un error entre 2 y 3°C para las medias mensuales. Ajustes similares se han encontrado por otros autores: entre altitud y precipitación, con una correlación de 0,938 para los meses de septiembre a junio, y errores inferiores al 20% (Kindschy, 1984); y entre viento, temperatura y humedad relativa con altitud y orientación (McCutchan, 1985; McCutchan y Fox, 1986). En este contexto, para la realización del mapa de temperaturas de Andalucía se tuvieron en cuenta la altitud y la orientación. En este proyecto se establecieron una serie de zonas climáticas homogéneas, en cada una de las cuales se calcularon rectas de regresión entre temperatura y altitud, pero para cada una de las orientaciones. Los resultados obtenidos en este trabajo superan el valor 0,80 en los coeficientes de correlación y 0,7 en el coeficiente de determinación (r^2), es decir, la altitud

explica entre el 65%, los menos de los grupos, y el 91%, la mayor parte de ellos, de las variaciones de la temperatura (Justicia y Domínguez, 1992).

También hay algunos ejemplos de interpolación en donde se prefiere optar por ajustes polinómicos de segundo y tercer grado y curvas logísticas entre temperatura, precipitación y altitud (Alonso et al, 1981; Moreno, 1989). Su justificación teórica reside en el hecho repetidamente observado de que los datos ajustados por rectas de regresión en la base y cima de las montañas quedan ligeramente desvirtuados con respecto a los datos reales. La hipótesis inicial es la existencia de un descenso más lento de las temperaturas en las vertientes de los valles y en las proximidades de las cumbres que en las laderas de la montaña, comportamiento que aparece perfectamente manifestado en la curva logística.

Un poco más complejo es el método propuesto por Benichou y Le Breton (1987), que genera un análisis de Com-

ponentes Principales para sintetizar la variedad de altitudes medias en una ventana de 11 x 11 celdillas en torno a cada punto del Modelo Topográfico Digital (malla kilométrica), considerando este tamaño como el más adecuado para reflejar la *varianza de media escala* del campo pluviométrico. Finalmente utilizan los Componentes Principales para generar un análisis de regresión con la precipitación media, obteniendo un coeficiente de determinación múltiple del 57%. Asimismo encuentran buenos resultados en la interpolación por *krigeage*, a partir de la varianza espacial de las estaciones disponibles.

Los SIG facilitan la aplicación de los modelos de interpolación y extrapolación a zonas concretas de estudio. Por un lado los Modelos Topográficos Digitales (MTD), incluidos en los SIGs, ofrecen una información muy detallada sobre la configuración del terreno: altitud, pendiente y orientación, que facilitan la información necesaria para la mayor parte de los métodos de interpolación y extrapolación propuestos (Boyer, 1985). Por otro lado, las posibilidades de análisis espacial de un SIG facilitan la aplicación de estas técnicas.

En un proyecto realizado en la región norooccidental de Venezuela (Martelo et al, 1991) se incorporaba la información puntual ofrecida por los observatorios meteorológicos con información procedente de un MTD (pendiente, azimut, índice de orientación de las pendientes al norte y al este, distancia al mar, efecto de escudo y altura de barrera). Mediante el uso de una regresión múltiple determinan cuales de estos actores serán utilizados en la interpolación de las distintas variables climáticas mensuales. En general, obtienen resultados satisfactorios para la precipitación en los meses de la época seca y durante la transición entre ésta y la época lluviosa (coeficientes de correlación entre el 0,68 y 0,90 y errores relativos inferiores al 0,33), pero para la época lluviosa anotan la necesidad de abordar análisis más profundos. Los resultados

de temperatura son aceptables todos los meses, con correlaciones superiores al 90% y errores inferiores al 6%.

Un ejemplo de aplicación a nuestro entorno de este tipo de métodos de interpolación, es el que tuvimos ocasión de realizar sobre la Sierra de Gredos (figura 3). En nuestro caso, se calcularon ecuaciones de regresión múltiple para la temperatura media y mínima, teniendo como variables independientes: altitud, orientación, pendiente, latitud y longitud. Las tres primeras se obtuvieron a partir de un modelo topográfico digital del área de estudio (3), obtenido por interpolación lineal a partir de las curvas de nivel: figura 5 (Salas y Chuvieco, 1992), con una resolución de 30 x 30 m. La orientación se calculó en grados, a partir del norte, y la pendiente en tantos por ciento. La latitud y longitud se obtuvo en coordenadas UTM.

Los cálculos de las funciones de regresión se basaron en estimaciones lineales, como recomiendan la mayor parte de los autores revisados. Los ajustes se realizaron por el método de inclusión sucesiva (Stepwise forward), desechando aquellas variables con un coeficiente F muy bajo. Las ecuaciones finalmente obtenidas son:

$$TPMEDAN = 142,64 - 0,00561 * A - 0,000028 * LA$$

$$TPMINAN = 164,66 - 0,0046 * A - 0,000035 * LA + 0,000015 * LO - 0,00594 * O$$

donde TPMEDAN y TPMINAN son la temperatura media y mínima anual, A la altitud, LA la latitud, LO la longitud, O la orientación y P la pendiente.

Los ajustes son bastante buenos para las temperaturas, con coeficientes de determinación (r^2) de 0,89 para la temperatura media anual (con un error comprendido entre -1,41 y 1,28°C), y 0,77 para la temperatura mínima (con

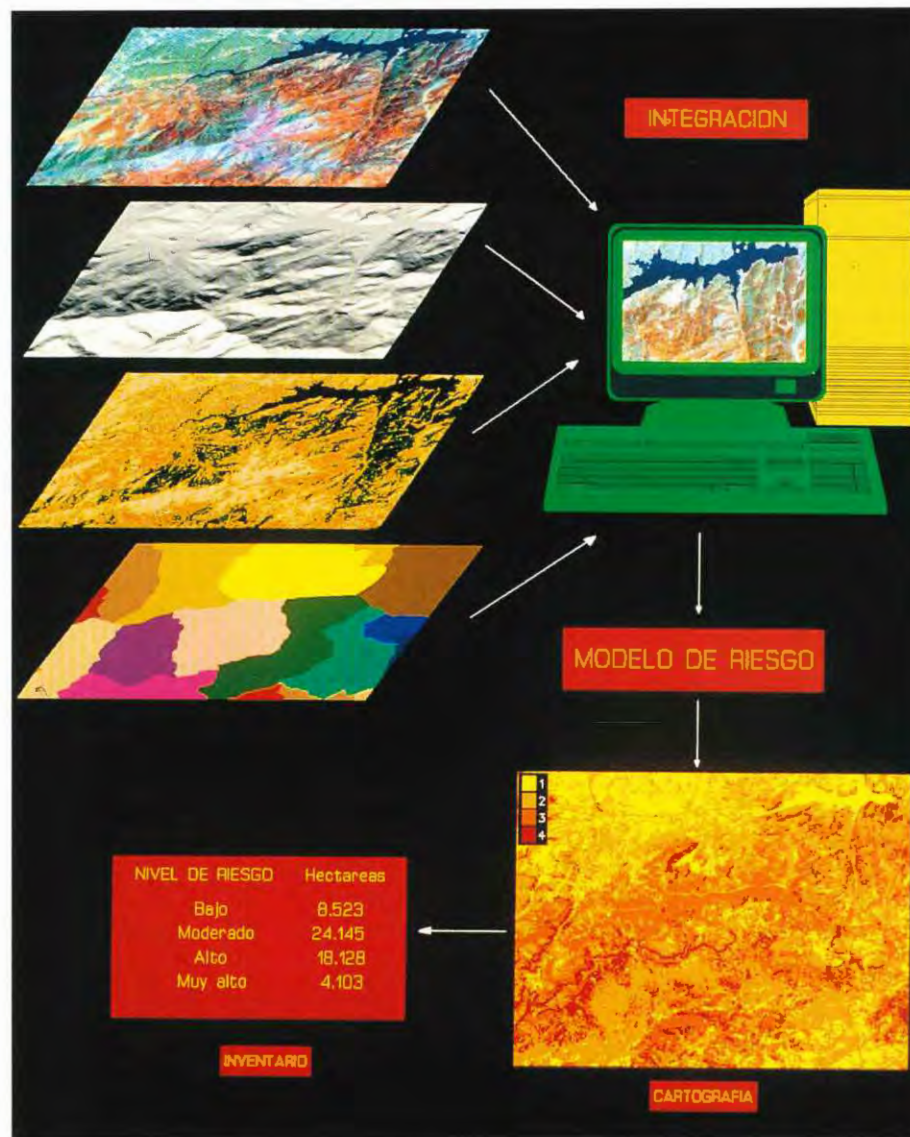


Figura 5: Esquema de un modelo de riesgo de incendio generado a partir de un SIG

errores -1,9 y 1,9°C). De las variables seleccionadas para el ajuste, como es lógico, la que ofrece una mayor información es la altitud, con porcentajes de varianza original del 85% para la temperatura media anual. A partir de los coeficientes de regresión, se puede generar un mapa de temperaturas, ya que las variables independientes están cartografiadas en el SIG desarrollado para este área (figura 4).

Además de la temperatura y precipitación, existen también otros criterios de interpolación y extrapolación espacial para estimar otras variables climáticas más complejas, como la radiación (Dubayah, 1991; Marsh, 1991), viento (Sherman, 1978; Ross et al, 1988; Hernández et al, 1993) o humedad relativa (Hungerford et al, 1989). Su cálculo también se basa en disponer de un modelo digital del te-

(3) El MTD se refiere únicamente al área de estudio, para las estaciones situadas fuera de ella, los datos de altitud, pendiente y orientación se calcularon a partir del mapa topográfico 1:50.000

rreno, a partir del que se modela la distribución espacial de la variable en cuestión. Una segunda variable auxiliar que precisa estos modelos es la cubierta del suelo (para el cálculo del albedo en el caso de la radiación, y de la fricción en el del viento).

SIG para evaluar el riesgo de incendios

Entre las variadas aplicaciones de los SIG a los estudios medioambientales, la prevención de incendios forestales constituye una de las que ofrece mayor importancia e interés, tanto por los efectos ecológicos, como por las pérdidas económicas y, en muchos casos también, humanas que conlleva este fenómeno. España es uno de los países más intensamente afectados en Europa, ocupando, en cifras absolutas, los primeros lugares en número de incendios, superficie afectada y pérdidas económicas. Si consideramos todas estas variables en función de la superficie de bosque mediterráneo existente, nuestro país se encuentra en una situación similar a la del resto de los países de la cuenca mediterránea.

Con este escenario, resulta especialmente importante diversificar las técnicas que nos permitan una mejor prevención de los incendios, una extinción más eficaz, y una más idónea restauración de sus consecuencias. Los SIG pueden ayudar en estos tres frentes (Hamilton et al, 1989), si bien resultan más idóneos para la prevención, puesto que permiten modelar el riesgo inherente a diversas variables, obteniendo un índice sintético que los integre a todos (Yol et al, 1985; Chuvieco y Congalton, 1989). Para ello, es preciso que se consideren las distintas variables espaciales que tienen un destacado papel en el inicio y propagación del fuego, como son la topografía, vegetación, clima y actividad humana.

En un trabajo desarrollado para el Servicio de Defensa contra Incendios

Forestales del ICONA, tuvimos ocasión de ensayar esta aplicación sobre un sector de alto riesgo en la Sierra de Gredos (Salas y Chuvieco, 1992). Para este área se diseñó un SIG orientado a la cartografía del riesgo, que incluyó las siguientes variables: elevación, pendiente, orientación, insolación, vegetación, red vial y áreas de recreo (figura 5). Todas ellas se convirtieron a formato raster, generándose una malla de 50 x 50 m en coordenadas UTM.

La superposición entre estas variables permitió generar distintos modelos asociados al riesgo; así se estableció una cartografía asociada a la probabilidad de ignición, que incluyó actividad humana, vegetación (clasificada de acuerdo a su inflamabilidad), insolación y altitud. Por otro lado, se estableció otra cartografía más relacionada con el comportamiento del fuego, esto es con su desarrollo espacial una vez que se inicia. Para ello se consideró de nuevo la vegetación, pero esta vez clasificada de acuerdo a la combustibilidad de los materiales, la pendiente y la orientación. Finalmente, se generó una cartografía sintética, que incluyó ambas concepciones del riesgo en un solo mapa. Obviamente, este modelo podría adaptarse a otros sistemas de riesgo, ya que una vez generado el SIG pueden contemplarse muy diversos escenarios de integración. Por ejemplo, no resulta excesivamente laborioso utilizar el mismo SIG para cartografiar otro índice de riesgo, como hemos tenido ocasión de comprobar en una reciente adaptación de este modelo al índice de predicción del peligro de incendio que utiliza actualmente el ICONA (Chuvieco y Salas, 1993).

Conclusiones

Este trabajo no pretende más que ofrecer algunos ejemplos en donde la aplicación de los SIG a estudio medioambientales resulta especialmente fructífera. Hemos intentado señalar algunas vías de trabajo, así como facilitar un pa-

norama que incluyera desde la óptica global a la de gran escala. No obstante, queda al curioso lector la labor de ampliar lo aquí sólo apuntado mediante la relación bibliográfica que se incluye al final del artículo. ■

Emilio Chuvieco

*Catedrático de Geografía
Universidad de Alcalá de Henares.*

Javier Salas

*Becario predoctoral del Departamento
de Geografía.
Universidad de Alcalá de Henares.*

Bibliografía

- ALONSO, J., MUÑOZ, J., GONZALEZ, C. y GARCIA, J. M. (1981). Aproximación a un modelo de delimitación de climas de montaña, VII Coloquio de Geografía, Pamplona, Tomo I: 5-13.
- ASRAR, G. (1990). Mission to Planet Earth: A global change programme, en *Proc. 16th Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Univ. College, Swansea, pp. i-v.
- BATISTA, G. T. y TUCKER, C. J. (1991). Accuracy of digital classification versus visual interpretation of deforestation in Amazon, en *Proc. V Simposium Latinoamericano de Percepción Remota*, Cuzco, pp. 407-423.
- BENICHOU, P. y LE BRETON, O. (1987). Pri-se en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques: la méthode Aurelhy, *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne*, Toulouse, INRA, pp. 51-68.
- BOLDIREV, V. G. (1988). The role of the World Meteorological Organization in developing global environmental databases, en *Building Databases for Global Science* (H. Mounsey, Ed.), Taylor and Francis, London, pp. 192-201.
- BOSQUE SENDRA, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*, Rialph, Madrid.
- BOYER, D. G. (1985). Estimation of daily temperature means using elevation and latitude in mountainous terrain, *Water Resources Bulletin*, 20 (4): 583-588.
- CAMPBELL, R. (1972). *Prediction of Air Temperature at a Remote Site from Official Weather*

- Station Records, Research Note RM-223, USDA, Forest Service.
- CHUVIECO, E. (1992). Teledetección, SIG y cambio global, en *V Coloquio de Geografía Cuantitativa*, Zaragoza, pp. 33-55.
- CHUVIECO, E. y CONGALTON, R. G. (1989). Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping, *Remote Sensing of Environment*, vol. 29, pp. 147-159.
- CHUVIECO, E. y SALAS, J. (1993). Geographic Information Systems for Wildland Fire Risk Modelling, *International Journal of Wildland Fire*, en prensa.
- CLARK, D. M., HASTINGS, D. A. y KINEMAN, J. J. (1991). Global databases and their implications for GIS, en *Geographical Information Systems* (D. Maguire, M. F. Goodchild y D. W. Rhind, eds.), Longman, London, vol. 2, pp. 217-231.
- DUBAYAH, R. (1991). *The topographic variability of solar radiation*, Tesis doctoral (no publicada), Departamento de Geografía, Universidad de California en Santa Bárbara.
- DELFINER, P. y DELHOMME, J. P. (1975). Optimum interpolation by Kriging, en J. C. Davis y M. J. McCullagh: *Display and analysis of spatial data*.
- FERNANDEZ, F. y MORENO, A. (1981). Elaboración automática del mapa de isoyetas en un área montañosa del centro peninsular, *VII Coloquio de Geografía*, Pamplona, Tomo I: 23-29.
- FERRIS, J. y CONGALTON, R. G. (1989). Satellite and geographic information system estimates of Colorado River basin snowpack, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1.629-1.635.
- HAMILTON, M. P., SALAZAR, L. A. y PALMER, K. E. (1989). Geographic Information Systems providing information for wildland fire planning, *Fire technology*, vol. 25, pp. 5-23.
- HERNANDEZ, E., DIAZ, J. y GARCIA, A. (1993). Modelo de diagnóstico para la velocidad y dirección del viento en orografía compleja, *Rev. de Geofísica*, 2: 109-114.
- HUNGERFORD, R. D., NEMANI, R. R., RUNNING, S. W. y COUGHLAN, J. C. (1989). *MTCLIM: A Mountain Microclimate Simulation Model*, Research Paper INT-414, USDA, Forest Service, Ogden (UT).
- KEMP, D. D. (1990). *Global Environmental Issues. A climatological approach*, Routledge, London.
- KINDSCHY, R. R. (1984). A method for estimating precipitation amounts at remote field site, *Northwest Science*, 58 (4): 256-261.
- JUSTICIA SEGOVIA, A. y DOMINGUEZ RODRIGUEZ, R. (1992). Notas metodológicas para la cumplimentación de series climáticas y extrapolación de datos. Su aplicación al mapa de temperaturas de Andalucía, *BAÉTICA. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 14: 55-80.
- LOPEZ-VISCOLO, J. M. (1989). La observación de la Tierra desde el espacio: el mapa de ocupación del suelo de la Comunidad Económica Europea, *Estudios Geográficos*, vol. 50, pp. 409-434.
- MARTELO, M. T., MENESES, C., RIVAS, C. y LEON, L. (1991). Proyecto piloto de regionalización de parámetros climáticos en una zona al noroeste de Venezuela en el contexto del Sistema de Información Computerizada del Ambiente (SICA), en *III Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica*, Viña del Mar (Chile): 7-17.
- MATSON, M. y HOLBEN, B. (1987). Satellite detection of tropical burning in Brazil, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 509-516.
- McCUTCHAN, M. H. (1985). Extrapolation of wind, temperature, and humidity on a cronically-shaped mountain, en *Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology*, Detroit (Michigan): 113-120.
- McCUTCHAN, M. H. y FOX, D. G. (1986). Effect of Elevation and Aspect on Wind, Temperature and Humidity, en *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25: 1.996-2.013.
- MOONEYHAN, D. W. (1988). Applications of Geographic Information Systems within the United Nations Environment Programme, en *Building Databases for Global Science* (H. Mounsey, ed.), Taylor and Francis, London, pp. 315-329.
- MOONEYHAN, D. W. (1991). GRID and the role of developing countries in the climate and global change programme, en *Environmental Monitoring. Application of Remote Sensing and GIS* (R. B. Singh, ed.), Geocarto International Centre, Hong Kong, pp. 1-13.
- MOREIRA, J. M. y GIMENEZ, P. (1993). El Sistema de Información Ambiental de Andalucía. SinambA. Una herramienta para el análisis y gestión del medio ambiente, *II Congreso de la Asociación Española de Sistemas de Información Geográfica*, pp. 491-498.
- MORENO SANZ, F. (1989). *Zonas kársticas en la vertiente N de la Sierra de Guadarrama*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- MOSS, R. H. (1992). Research on global change and its human dimensions, *Global Change Newsletter*, vol. 9, pp. 2-5.
- MOUNSEY, H. M. (1991). Multisource, multinational environmental GIS: lessons learnt from CORINE, en *Geographical Information Systems* (D. Maguire, M. F. Goodchild y D. W. Rhind, eds.), Longman, London, vol. 2, pp. 185-200.
- MUÑOZ MUÑOZ, J. (1979-1980). Una aproximación al cálculo de las temperaturas en el Valle de Lozoya, *Geographica*, XXI-XXII: 95-107.
- MYERS, N. (1991). Tropical deforestation: the latest situation, *BioScience*, vol. 41, p. 282.
- NELSON, R., CASE, O., HORNING, N., ANDERSON, V. y PILLAI, S. (1987b). Continental land cover assessment using Landsat MSS data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, pp. 61-81.
- PEUQUET, D. J. (1988). Issues involved in selecting appropriate data models for global databases, en *Building Databases for Global Science* (H. Mounsey, ed.), Taylor and Francis, London, pp. 66-78.
- POLO, C., VILLARINO, M. y RODRIGUEZ, R. (1981). El cálculo de la precipitación en una cuenca de montaña. Aplicación del método Thiessen, *VII Coloquio de Geografía*, Pamplona, Tomo I: 13-22.
- RHIND, D. y CLARK, P. (1988). Cartographic data inputs to global databases, en *Building Databases for Global Science* (H. Mounsey, ed.), Taylor and Francis, London, pp. 79-104.
- ROSS, D. G., SMITH, I. N., MANINS, P. C. y FOX, D. G. (1988). Diagnostic wind field modelling for complex terrain: Model development and testing, *J. Appl. Met.*, 27: 785-796.
- SALAS, J. y CHUVIECO, E. (1992). ¿Dónde arderá el bosque? Previsión de incendios forestales mediante un SIG, *I Congreso de la AESIGYT. Los Sistemas de Información Geográfica en la Gestión Territorial*, Madrid, pp. 430-446.
- SHERMAN, C. A. (1978). A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, *Journal of Applied Meteorology*, 17: 312-319.
- TAMEISHI, H. (1991). Fisheries detection using NOAA satellite, en *Applications of Remote Sensing in Asia and Oceania* (S. Murai, ed.), Asian Association on Remote Sensing, Hong Kong, pp. 323-332.
- TAYLOR, B. y WAITE, W. (1980). Interpolating climatological data for rugged terrain: some analytical techniques, en *Sixth Conference on Fire and Forest Meteorology*, Seattle (Washington): 163-173.
- TENG, W. L. (1990). AVHRR monitoring of US crops during the 1988 drought, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 1.143-1.146.
- TOBLER, W. y CHENZ, Z. (1986). A quadtree for global information storage, *Geographical Analysis*, vol. 18, pp. 360-371.
- TOMLINSON, R. F. (1988). Opening remarks, en *Building Databases for Global Science* (H. Mounsey, ed.), Taylor and Francis, London, pp. 1-9.
- UNNINAYAR, S. (1988). The global system, observing and monitoring change. Data problems, data management and databases, en *Building Databases for Global Science* (H. Mounsey, ed.), Taylor and Francis, London, pp. 357-377.
- WALKER, B. H. (1990). A framework for modelling the effects of climate and atmospheric change on terrestrial ecosystems, *Global Change Report*, vol. 11, pp. 1-22.
- YOOL, S. R., ECKHARDT, D. W., ESTES, J. E. y COSENTINO, M. J. (1985). Describing the brushfire hazard in southern California, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 75, pp. 417-430.