

# Els sistemes d'informació geogràfica: la nova carta

Xavier Pons\*

Rebut: 25.09.96  
Acceptat: 07.10.96

## Resum

En aquest article es dona una visió introductòria dels sistemes d'informació geogràfica (SIG), tant des del punt de vista de la seva aplicabilitat i utilització com des del punt de vista del seu funcionament i de la teoria subjacent a les seves estructures i models de dades espacials i alfanumèriques. El text fa especial èmfasi en els aspectes d'interès en relació amb l'estudi i gestió del patrimoni natural i es completa amb una bibliografia de referències seleccionades i un apèndix sobre la introducció de dades als SIG.

**MOTS CLAU:** SIG, GIS, ràster, vector, anàlisi espacial, cartografia.

## Abstract

### Geographic information systems: the new chart

This paper gives an introduction to geographical information systems (GIS), both from the point of view of their applicability and use and from the point of view of how they work

\* Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona i Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREA. E-08193 Bellaterra.

and the underlying theory on spatial and alphanumeric data structures and models. The text emphasizes the relevant aspects related to the study and management of natural heritage and is complemented with a selected list of references and an appendix covering data input in GIS systems.

**KEYWORDS:** GIS, raster, vector, spatial analysis, cartography.

## Resumen

### Los sistemas de información geográfica: la nueva carta

En este artículo se ofrece una visión introductoria de los sistemas de información geográfica (SIG), tanto desde el punto de vista de su aplicabilidad y utilización como desde el punto de vista de su funcionamiento y de la teoría subyacente a sus estructuras y modelos de datos espaciales y alfanuméricos. El texto hace especial énfasis en los aspectos de interés relacionados con el estudio y gestión del patrimonio natural y se completa con una bibliografía de referencias seleccionadas y un apéndice sobre la introducción de datos en los SIG.

**PALABRAS CLAVE:** SIG, GIS, ráster, vector, análisis espacial, cartografía.

## Introducció

En els darrers anys, el terme sistemes d'informació geogràfica, o les seves sigles en català (SIG) o en anglès (GIS, per *Geographical Information Systems*), ha passat al primer pla de l'activitat de molts professionals d'àmbits ben diversos: geògrafs, economistes, urbanistes, i, naturalment, també de biòlegs i geòlegs, entre d'altres. L'activitat en el camp dels SIG ha evolucionat, en pocs anys, de la pura recerca universitària a una gran popularització, fins al punt que SIG senzills ja han aparegut sota la forma de guies urbanes de ciutats importants o d'instruments d'ajuda a la circulació automobilística. A aquesta efervescència hi han contribuït l'espectacular avenç en la capacitat de processament dels ordinadors en els últims quinze anys, l'esforç fet en la millora de les interfícies amb l'usuari (millors sistemes gràfics, amb més colors i resolució, orientació a objectes, etc.) i, òbviament, l'interès que té per a molta gent el fet de poder accedir a dades vinculades amb la posició que ocupen en el món que ens envolta.

En aquest article donarem una visió introductòria del que són els SIG, centrant l'atenció en la perspectiva de l'ús que en pot fer un naturalista. Tanmateix, si el lector fa volar una mica la imaginació veurà com les aplicacions en altres camps (urbanisme, planificació de xarxes de comunicacions, etc.) poden ser igualment interessants i útils: «Quin és el camí més curt per anar a l'hospital a aquesta hora de la tarda?», «Quina és la distribució del fracàs escolar en aquest país?». La bibliografia que apareix al final recull els principals manuals que es poden trobar sobre el tema.

## Què és un SIG?

Podem definir un SIG com un sistema informatitzat destinat al maneig (captació, emmagatzematge, consulta, anàlisi i representació) d'informació localitzada geogràficament. Un SIG està compost per tres elements bàsics. El primer és el *hardware* sobre el qual descansa el sistema, que determinarà les capacitats de processament de què disposem. El segon és el *software* amb què manegem les dades, que determinarà les capacitats funcionals amb què ens podem adreçar a aquestes dades. Finalment tenim les dades en si, tant si són de tipus purament espacial (com ara el contorn d'una massa boscosa) com si són dades alfanumèriques de natura geogràfica (per exemple, un cens dels ocells de cada municipi).

Fa uns anys l'èmfasi es posava en el *hardware*, ja que aquest era la part més limitadora de la funcionalitat real d'aquests sistemes. Més endavant, amb l'augment de capacitat de processament dels ordinadors, els programes van passar a primer terme: podent tractar cada cop més dades, calia implementar un conjunt d'eines cada cop millors i més completes. Tot i que aquests dos aspectes no estan ni molt menys tancats, la principal limitació actual la formen ja les dades en si i la seva estructuració. En efecte, avui dia no és estrany disposar d'un SIG compost per un sofisticat equipament informàtic i un car programari, però en el qual el volum de dades per manipular és migrat o de qualitat força baixa. I és que les dades que s'incorporen a un SIG tenen tres tipus de problemàtica: la temàtica, la planimètrica i la temporal. A l'esforç habitual de formar una base de dades alfanumèrica convencional hi hem d'afegir els aspectes espacials i, a més, el control de la qualitat espacial i temàtica de les dades. El component temporal de la informació té tanta rellevància

com a qualsevol base de dades que reculli fenòmens o entitats amb una certa dinàmica temporal.

Més enllà d'aquesta definició relativa a la seva estructura i funcionalitat, podem dir que la característica més distintiva d'un SIG és la seva capacitat d'interrelacionar o integrar diferents conjunts d'informació sobre fenòmens o localitzacions en virtut de la seva localització i relacions en l'espai. És molt habitual que un SIG contingui capes d'informació relatives a altitud, a vegetació, a divisions administratives i de la propietat, etc., i que es consulti aquesta informació bé individualitzadament, bé per encreuament entre capes («A quines alçades es distribueix aquest tipus de vegetació?»).

Els SIG mantenen estretes interrelacions amb altres camps de la ciència i la tecnologia, com ara la cartografia automàtica (*automated mapping*, AM), el disseny assistit per ordinador (*computer assisted design*, CAD), la teledetecció (*remote sensing*, RS), els sistemes de processament d'imatge, els sistemes de gestió de bases de dades (*database management systems*, DBMS) o els sistemes d'anàlisi estadística.

La definició de SIG com a sistema informàtic és una idea moderna. Tanmateix, i tot i que no amb aquest nom, és de justícia recordar que les recopilacions de dades geogràfiques diverses relatives a un cert àmbit no són pas noves. Com a exemple podem esmentar els projectes de cartografia d'una part de la Mediterrània que Roger II de Sicília va fer fa prop de mil anys.

### La concepció de l'espai en els SIG

En utilitzar un SIG ens veiem obligats a fer una sèrie d'abstraccions o assumpcions per a representar la realitat geogràfica com a informació susceptible de ser processada

per un ordinador. La idea no és nova, ja que la cartografia convencional sovint ha de fer un procés similar per a poder expressar-se al damunt d'un paper. La primera d'aquestes abstraccions fa referència a la dimensionalitat de l'espai que considerem. Per una doble raó de tradició cartogràfica en superfícies de paper i de l'enorme cost computacional que representa el càlcul en un espai de tres dimensions, la majoria de SIG actuals són essencialment bidimensionals, i és en aquest context que ens centrarem en aquest article; tanmateix, i com tindrem ocasió de veure, els SIG bidimensionals tenen alguns recursos per al tractament de dades de relleu i similars. Assumint, doncs, un espai bidimensional, la segona abstracció ens porta a parlar dels dos sistemes més emprats en la representació de la informació geogràfica: el sistema ràster i el sistema vectorial.

En el sistema ràster, l'espai geogràfic s'adapta a una estructura tessel·lar, formada per cel·les (píxels), normalment de forma quadrada, que constitueixen la unitat elemental d'informació del territori; d'aquesta manera, l'espai se subdivideix en quadrats a cadascun dels quals assignem un tipus de vegetació, d'unitat geològica, etc. En el sistema vectorial, en canvi, l'èmfasi es posa en objectes geomètrics que pretenen descriure la realitat a través de punts, línies o polígons; així, per exemple, podem utilitzar els punts per a situar (georeferenciar) nius d'ocells o citacions florístiques, les línies per a cursos d'aigua o canvis abruptes del relleu, i els polígons per a masses boscoses o d'unitats geològiques. La figura 1 il·lustra aquests dos models de dades.

En el fons, la idea d'aquestes dues formes de representació enllaça amb les dues grans formes actuals de representacions pictòriques en format digital: la basada en mapes de bits (*bitmap*), equivalent a la ràster

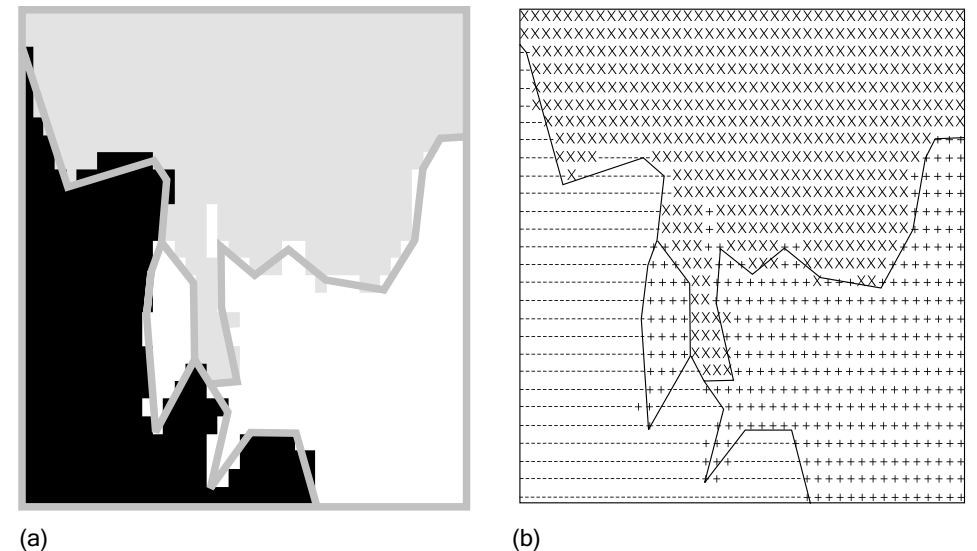


FIG. 1. Representació ràster i vectorial d'un mateix fenomen de tipus zonal (a) i codificació interna en un SIG (b). En la representació ràster típica, l'espai es divideix en cel·les i s'assigna a cadascuna un codi d'acord amb el fenomen considerat; a (b) podem veure que hi ha cel·les codificades amb codis 'X', '+' i '-'; aquests codis es visualitzen en colors diferents (a) per a una millor comprensió visual (tons blanc, gris i negre). En la corresponent representació vectorial, l'espai queda descrit implícitament per les àrees delimitades per les línies frontereres (a); en aquest cas l'ordinador emmagatzemarà les coordenades de cada vèrtex de les línies en les unitats del sistema de projecció cartogràfica emprat (UTM, Lambert, etc.) (b, no explicitades per millorar la claredat de la figura). Noteu que la fidelitat amb què queda descrita una forma depèn, en el model ràster, de les dimensions de la cel·la (com més petita, més detallada és la descripció), mentre que en el model vectorial depèn de l'error associat a la ubicació de cada coordenada (vèrtex de les línies) i del nombre de vèrtexs utilitzats per a descriure la forma geomètrica de l'entitat.

i usada, per exemple, en els programes de retoc fotogràfic de qualitat o en la mateixa representació icònica de la majoria d'interfícies gràfiques actuals, i la vectorial, usada en aplicacions de disseny gràfic orientades al tractament d'objectes geomètrics (des de

Raster and vector representation for a given zonal phenomenon (a) and internal coding in a GIS (b). In the typical raster representation, space is divided into cells and a code is assigned to each cell according to the considered phenomenon; (b) plate shows cells coded using 'X', '+' and '-' codes; these codes are shown (a) using different colors (white, grey and black) to give a better visual understanding. In the corresponding vector representation, space is implicitly described by areas delimited by boundaries (a); in this case the computer stores the coordinates of each line vertex in the units of the cartographic projection system used (UTM, Lambert, etc.) (b, not reported for the sake of clarity). Note that the fidelity describing a shape depends, in the raster model, on the cell dimensions (the smaller the cells, the more accurate the description of the shape), while in the vector model it depends on the error associated to the placement of each coordinate (line vertex) and on the number of vertices used to describe the geometric shape of the entity.

línies i polígons als mateixos textos, els quals són, de fet, manipulats com si fossin polígons). Hi ha encara altres termes per referir-se a les dades en aquests formats (o a subtipus particulars d'aquestes dades): *lattice* (enreixat), *array* (formació, matriu)

o *grid* (xarxa regular) per als ràsters, i polilínies, *strings* o cadenes (*chains*) per als vectors. El lector interessat pot trobar informació relacionada a Peuquet (1981), Maguire & Dangermond (1991), Burrough (1986) o Laurini & Tompson (1992).

El fet que hi hagi aquestes dues grans aproximacions ha fet córrer molta tinta amb la finalitat de mostrar les excel·lències de l'una i l'altra, però no resulta estrany si pensem que un sistema d'informació geogràfica és un sistema d'informació espacial i que, per tant, és lògic que existeixi una gran preocupació pel model de dades utilitzat per a representar l'espai geo-gràfic. A continuació intentarem exposar els principals avantatges i inconvenients d'ambdós sistemes. Tanmateix, el cert és que actualment se sol acceptar la necessitat que els programes donin suport a les dues aproximacions, ja que per certes dades o aplicacions és clarament més convenient adoptar-ne una de les dues.

L'aproximació ràster té com a principals avantatges:

–Simplicitat de concepció i implementació, que fa que pugui funcionar en ordinadors amb menor capacitat de càlcul que els requerits per a tractar dades vectorials i que les operacions de superposició de mapes siguin ràpides i eficients.

–Els processos d'accés a la informació (consulta) són molt ràpids i senzills.

–Els processos d'anàlisi per superposició de capes (típics dels SIG) són molt ràpids i senzills sempre que es treballi sobre una mateixa malla de referència, ja que es realitza una operació de comparació cel·la a cel·la dels atributs emmagatzemats a cada capa.

–Quan la variació espacial és molt alta, la natura quasicontínua de les cel·les permet una forma altament eficient d'emmagatzemar

zematge, representació, consulta i anàlisi. Pensem, per exemple, en dades de relleu, d'insolació, de climatologia, de biomassa, de nivells piezomètrics, etc.

–És el format d'elecció en cas de necessitar un tractament eficaç d'imatges fotogràfiques (fotografia aèria, imatge de satèl·lit, etc.).

–És el format nadiu amb què s'adquireixen les dades amb els escàners de taula i amb els sensors remots de teledetecció (per tant, també són en format ràster les dades que s'obtenen per classificació digital d'imatges multispectrals).

Els seus desavantatges més importants són:

–Incapacitat per a representar fidelment entitats on la delimitació per coordenades és real per als humans (perquè així ho hem establert) i és crítica (com ara els límits municipals o les parcel·les cadastrals). Amb una cel·la de mida molt i molt petita es podria tenir una bona representació, però resulta evident que aquesta no és l'aproximació correcta, donada la natura d'aquest tipus de dades.

–Algunes relacions topològiques poden ser més costoses d'analitzar, particularment les relacionades amb xarxes.

–La representació en cel·les és poc adequada per a les entitats que es volen tractar com a objectes lineals, com ara els rius a escales generals (a escales de detall es tractaran com un polígon ràster –làmina d'aigua– sense més problemes).

–Moltes transformacions geomètriques de la base cartogràfica (escalat dels eixos no múltiple del costat de la cel·la, rotacions, canvi de projecció cartogràfica, etc.) obliguen a una pèrdua de la qualitat geomètrica, donada la rigidesa de la divisió inicial en quadrats (cal notar que l'adopció del quadrat

no és més que una convenció resultant de l'estret lligam amb la representació posterior en pantalles i impressores i de la superior facilitat de programació i concepció respecte a tècniques teòricament més adequades, com ara els hexàgons).

–Quan s'amplia (*zoom*) la zona d'estudi per damunt d'un cert límit comença a aparèixer la natura «pixelada» de les cel·les (de vegades també dita «en escaleta»), i es crea un efecte estèticament poc acceptable des del punt de vista de la cartografia convencional.

–Enorme volum de dades per emmagatzemar si la dimensió de la cel·la és molt petita. Tanmateix, aquest inconvenient ha de ser matisat, ja que precisament resulta de la gran quantitat d'informació que poden contenir les bases de dades en format ràster; en el cas que la informació sigui realment redundat hi ha tècniques de compressió/descompressió molt ràpida de les dades que poden reduir a entre un 10 % i un 1 % l'espai necessitat originalment; per la seva banda, quan la informació és espacialment molt complexa també les bases vectorials esdevenen molt més grans.

Els sistemes vectorials presenten com a principals avantatges:

–Una possibilitat de delimitació molt més precisa quan el nostre objecte d'estudi pot ésser representat com una entitat geomètrica; és per això que les mesures de distància, perímetre o superfície acostumen a ser també més precises. Malgrat el que acabem de dir, i tot i que sembli paradoxal, en alguns casos les delimitacions més precises actualment disponibles són en format ràster; en efecte, quan la delimitació no té un origen humà (per exemple, límits municipals) la informació geogràfica recollida per sensors remots o fotografies aèries (ràster) dona una millor delimitació:

la millor descripció de la costa de Catalunya no és a cap base topogràfica vectorial sinó a les ortofotos 1:5.000 (píxel de 50 cm) que publica l'Institut Cartogràfic de Catalunya.

–La codificació explícita de les relacions topològiques permet un tractament òptim de problemes de veïnatge, xarxes de comunicacions, etc.

–Com que són orientats a entitats, és més fàcil adreçar-se a aquests elements (en la majoria de sistemes ràster la definició dels objectes és implícita i cal fer-la explícita sempre que cal adreçar-s'hi).

–Les rotacions, els canvis de projecció cartogràfica, etc pràcticament no comporten pèrdues en la definició geomètrica original.

–En mapes senzills, l'espai requerit per a l'emmagatzematge és menor.

–L'aspecte gràfic és més semblant als tradicionals mapes topogràfics sobre paper.

Els seus desavantatges més importants són:

–Més gran complexitat de dades, la qual cosa dificulta la programació i alenteix molts dels processos de cerca, actualització i superposició.

–Menor capacitat analítica, probablement per la superior complexitat conceptual del model vectorial, però també perquè els usuaris d'aquests sistemes no semblen reclamar millores en aquest sentit (solen realitzar consultes o anàlisis molt simples).

–La fidelitat de les dades a la realitat és altament dependent de l'exactitud amb què es dona cada coordenada i del nombre de coordenades amb què es representen les entitats. Això és especialment crític en objectes «naturals» com ara rius, línies de costa, etc.

—Quan s'amplia (*zoom*) la zona d'estudi per damunt d'un cert límit comença a fer-se molt palès (en entitats lineals i en vores de polígons) l'aspecte de línia poligonal que es deriva de la natura basada en trams rectilinis de la majoria dels sistemes vectorials. Aquest efecte, quan fa referència a entitats com ara corbes de nivell, vores de bosc, etc. és estèticament poc acceptable des del punt de vista de la cartografia convencional.

—Incapacitat per a representar de forma eficient fenòmens de variació quasicontínua a l'espai (relleu, temperatura, etc.), així com imatges de natura fotogràfica.

—La introducció i estructuració de les dades sol ser més costosa en temps humà i en procés de càlcul.

Els sistemes vectorials donen una idea perfecta, platònica, del món. De fet molt poques de les entitats que tracta un sistema vectorial són en la realitat com les descriu el sistema. Només aquelles que han estat definides pels humans de forma arbitrària, i alguns límits naturals (molt pocs) poden ser considerats relativament estàtics. En efecte, mentre que els límits d'una edificació o d'un municipi es defineixen *a priori* així, altres «objectes», com ara un riu, les vores d'un llac, els límits d'un bosc o d'una unitat edàfica, etc. són essencialment borrosos, especialment a partir de les escales de detall en què, cada dia més, treballen els SIG. Per això en molts entorns científics i de planificació i gestió del medi ambient, en què no es necessita un treball tan fi amb les delimitacions dels objectes d'estudi (delimitació per altra banda normalment no tan precisa, si hem de ser honestos), es prefereix utilitzar una aproximació ràster pels motius abans comentats de capacitat de modelització i rapidesa de càlcul. Només qui no ha fet mai un mapa de vegetació o de la distribució d'un animal no entén que

l'aproximació en cel·les sigui perfectament vàlida en la majoria de casos. Per contra, la importància que té per a la gestió l'estricta respecte dels límits descrits pels textos legals i de la propietat porten a la utilització majoritària de sistemes vectorials en entorns d'urbanisme, cadastre, etc. Com hem dit anteriorment, la tendència actual és utilitzar sistemes mixtos, capaços de treballar amb l'aproximació més adient en cada cas.

Malgrat que els sistemes ràster disposen de forma directa de la més gran quantitat d'informació geogràfica avui existent en format digital, les imatges de satèl·lit, hi ha una quantitat important d'informació geogràfica preexistent en mapes impresos o informatitzada en formats vectorials, que pot incorporar-se als sistemes ràster per complementar-los. El procés de pas d'estructures vectorials a estructures ràster s'anomena rasterització. A la inversa, la informació ràster pot convertir-se en molts casos a informació vectorial a través del procés anomenat vectorització.

## L'emmagatzematge i tractament de les dades no directament espacials

Els SIG no només contenen dades espacials, sinó que també emmagatzemen dades alfanumèriques associades a les cel·les dels ràsters o als punts, línies i polígons dels vectors. Aquestes dades poden fer referència a les espècies animals presents en un inventari puntual, a les característiques litològiques d'una zona, etc. Pel que fa a les estratègies d'emmagatzematge i tractament seguides actualment per a aquestes dades, podem dir que la majoria de les implementacions actuals de SIG opten per una de dues estratègies: la basada en atributs únics i la basada en el lligam amb sistemes gestors

de bases de dades convencionals (SGBD, DBMS en terminologia anglosaxona). La primera estratègia es presenta en sistemes vectorials simples, que normalment no preveuen relacions topològiques entre elements, i en molts sistemes ràster. Un exemple típic és una base de comarques en què cada entitat (polígon) té com a atribut el nom de la comarca; un altre exemple el constitueix un fitxer ràster en què cada cel·la conté l'altitud del punt central o el tipus de vegetació o d'ús del sòl principal.

La segona estratègia es presenta en els sistemes vectorials més complets i en alguns (pocs) sistemes ràster. Aquesta aproximació és recomanable quan es treballa amb entitats que presenten, de forma natural, diverses característiques susceptibles de ser emmagatzemades conjuntament en una base de dades convencional, com ara la base comarcal de l'exemple anterior, en què pot ser interessant saber, a part del nom de la comarca, quina és la seva població i la seva capital.

El treball amb atributs únics permet una gestió més simple, però ofereix inferiors possibilitats de consulta sobre una capa donada. Tanmateix, també aquí cal adonar-se que les capes que fan referència a la història natural són poc properes a la segona aproximació: normalment a un cert tipus de sòl no hi podem associar indefectiblement una altra característica, i la forma més eficient de tractar l'espai sol ser disposar de diverses capes en què es recullin, com a atributs únics, els tipus de sòl, la vegetació, l'altimetria, etc., i combinar-les quan i com convingui per a extreure'n la informació que ens interessa.

## La utilització dels SIG

Des del punt de vista de l'usuari, les dues preguntes fonamentals que es poden fer a un SIG són «Què hi ha a tal lloc?» i «On és

tal cosa?». Tot i que un SIG pot respondre a qüestions força més complexes, la immensa majoria de cops que un usuari utilitza el sistema ho fa per respondre una d'aquestes dues preguntes, anomenades consulta per localització i consulta per atributs, respectivament. Com a exemples de la primera podríem indicar: «Quina és la vegetació en aquest punt?» o «A quina alçada es troba aquesta coordenada?»; com a exemples de la segona podríem indicar: «Mostra'm totes les zones de dipòsits quaternaris» o «On ha estat citat el tàxon *Podarcis lilfordi*?». El primer tipus de pregunta exigeix que el sistema sigui capaç d'interrogar la base de dades a través d'anàlisi espacial, cosa que no és possible de fer amb sistemes gestors de bases de dades alfanumèriques convencionals. La resposta al segon tipus de qüestió, en canvi, se sol basar en una cerca més semblant a la d'aquells gestors: cerca d'un determinat element o característica i bolcat final dels registres trobats que satisfan la pregunta plantejada; la diferència, però, és que ara els elements trobats són entitats (o localitzacions) geogràfiques, ja més lluny del domini habitual dels SGBD, que tindrien més dificultats per mostrar-nos el resultat (que no és exclusivament un conjunt de registres, sinó que també és un conjunt de cel·les ràster, de polígons, etc.).

El tipus de qüestions plantejables en un SIG, però, permet altres possibilitats, com ara la consulta de relacions espacials de proximitat: «A quines distàncies d'aquella indústria han estat trobats els individus poliploides?», la consulta de relacions espacials de veïnatge: «Són en contacte els camps de conreu on caça aquell ocell i els bosquets on nia?» o la consulta de relacions espacials de contenció: «Aquesta zona cremada era dintre una àrea arbustiva?». També es poden demanar les característiques

espacials (àrea, perímetre, forma, etc.) d'un fenomen: «Quina és la relació àrea/perímetre d'aquestes zones cremades?» o fer consultes sobre quina és la ruta més curta (o la menys costosa en termes de desnivell, penetrabilitat, etc.) sobre una xarxa de corredors biològics.

Com és natural, el sistema sol admetre, bé de forma directa o indirecta, consultes més complexes d'acord amb una sèrie de condicions i/o recomptes: «Mostra totes les zones de dipòsits quaternaris que tinguin una superfície superior als 100 m<sup>2</sup>», «Seleccióna totes les illes de vegetació no cremades en incendis que presentin un mínim de dues illes interiors o bé que, present-tant-ne una de sola, tingui un perímetre superior a 1 km», etc. Encara dintre de les consultes de tipus espacial, hem d'esmentar les anàlisis de distribució: «És contagiosa la distribució de les poblacions d'aquest organisme?», «Com es distribueixen els casos de leucèmia respecte a les centrals nuclears d'un país?».

Si tenim en compte que la informació geogràfica té, a més de components espacials i temàtics, un component temporal, veiem que si disposem d'informació relativa a dos o més moments històrics diferents podrem abordar qüestions com ara «És veritat que els boscos de la serra de Collserola cada cop són més rics en roures?», «En quines zones de la comarca els sòls han mostrat una disminució del pH superior a 1,5 unitats?» o «On són els pous que han presentat contaminació per nitrats durant les cinc darreres campanyes de control?».

Finalment, el sistema permet plantejar models de canvi espacial a diferents escales (per la qual cosa els SIG s'han utilitzat per simular propagació d'incendis), simular canvis en els usos del sòl i avaluar-ne les conseqüències, etc. Cal dir que els tipus d'ordinadors i programes utilitzats pels SIG

solen preveure el maneig de grans volums de dades i un important esforç de càlcul, per la qual cosa són especialment indicats per a estudis de modelització.

### La tercera dimensió

Tot i que, com hem dit, la majoria de SIG són bidimensionals, molts d'ells permeten el tractament del relleu a través d'estructures més o menys especials. L'aproximació més utilitzada és la denominada «model digital d'elevacions» (MDE, o DEM en la terminologia anglosaxona). Un MDE sol ser un fitxer ràster que recull, per al centre de cada cel·la, la seva altitud; donada la natura de la distribució de les dades altimètriques, l'altitud en qualsevol punt altre que el centre d'una cel·la es pot obtenir utilitzant tècniques especials d'interpolació. En zones de relleu complex pot ser necessari densificar la xarxa de mostreig amb cel·les menors o amb cotes complementàries i/o amb línies que indiquin i parametritzin trencaments en la continuïtat de les ondulacions «normals» del terreny (*break lines*).

Els MDE són de gran utilitat ja que, a més de facilitar la informació altimètrica permeten obtenir informació derivada, com veurem en els exemples finals. Els MDE també permeten superposar-hi altres capes d'informació per tal d'obtenir-ne representacions tridimensionals.

Els sistemes estrictament vectorials solen adoptar un model de representació que simplifica el terreny en zones triangulars irregulars de pendent i exposició similars; la densitat de triangles és més alta en les zones de relleu complex. Aquest model s'anomena TIN (per *Triangulated irregular network*).

Cap d'aquestes estructures, però, no permet el tractament adequat en el cas de

necessitar un tractament tridimensional complet, com ara en la cartografia d'avencs i cavitats subterrànies. En aquests casos caldrà recórrer a sistemes especialitzats, ja que els SIG de propòsit general no incorporen aquesta possibilitat computacional i perquè els representaria una càrrega d'emmagatzematge massa elevada, de la qual es beneficiarien en molt poques ocasions.

### Però... i els mapes convencionals en paper?

La utilització dels SIG no suposa cap disjunció respecte a l'ús dels mapes convencionals, sinó que simplement en suposa un immens enriquiment: sempre és possible imprimir un mapa en paper a partir de la informació continguda en el SIG, però el procés oferirà una flexibilitat de possibilitats fa pocs anys inimaginable. Penseu, per exemple, en la comoditat d'imprimir només algunes corbes de nivell d'un mapa topogràfic per a facilitar-ne la visualització, fer un mapa mut a efectes docents, combinar una part del mapa amb un mapa de vegetació, etc. Tot i que l'extensió d'aquest treball no permet estendre's en la interessant comparació entre el mapa analògic i el mapa digital, cal fer-ne algun apunt per comprendre la revolució que els propis SIG han suposat en el món de la cartografia.

En primer lloc hem d'esmentar algunes de les limitacions del mapa clàssic com a sistema d'informació: reducció del volum d'informació per imperatius de representabilitat i llegibilitat (amb enorme dependència de l'escala elegida), dificultat d'extreure i combinar informació entre mapes de diferent temàtica, de diferent moment temporal i de diferent full, i dificultat d'actualització.

Els SIG superen moltes d'aquestes dificultats perquè el suport informàtic permet una superior facilitat de manteniment i recuperació de dades, menor cost de rèplica (un cop formada la base), possibilitat de tècniques de mesura més complexes i molt menys basades en la subjectivitat de l'interpret de la informació, transformacions geomètriques automàtiques (reprojeccions, generalitzacions i agregacions, etc.), anàlisi de canvis temporals, així com tota una llarga sèrie de funcionalitats que faciliten tant l'anàlisi científica i tècnica com la representació cartogràfica tradicional. Cal destacar que la integració de l'entrada de dades, l'anàlisi i la presa de decisions sobre un mateix sistema facilita la feina i sol fer-la molt menys propensa a errors.

### Inconvenients dels SIG

Tot i les potencialitats que hem exposat en el text anterior, els SIG presenten unes certes problemàtiques de les quals cal ser-ne conscient si hom planteja la seva utilització en un cert àmbit. Podem dividir aquestes problemàtiques en les que són econòmiques (sigui en termes de material o de temps humà), les que són de tècniques i les de tipus més conceptual.

Pel que fa als inconvenients econòmics, en primer lloc cal dir que, tot i que un cop implementats poden abaratir extraordinàriament molts processos, el cost de formació de les bases de dades sol ser elevat; com és evident, aquest inconvenient no existeix si les bases ja han estat formades per algun organisme, empresa, etc. que les distribueix de forma assequible. Per altra banda, les bases de dades geogràfiques digitals solen comportar, per la seva facilitat d'exploració, unes demandes d'actualització molt superiors

a les de les analògiques. Per tant, i tot i que el manteniment i actualització de les primeres és molt més simple, el procés pot arribar a comportar costos importants.

Un altre factor que cal valorar és el cost de formació del personal que ha de dissenyar, operar i gestionar el sistema d'informació, així com el cost de formació de les persones que hi volen treballar com a «usuaris». Tot i que s'està fent un esforç important per a facilitar-ne l'aprenentatge i l'ús (unificació de terminologia, simplificació i amigabilitat d'aspectes informàtics, etc.), resulta clar que la riquesa i complexitat d'informació que ens pot oferir un SIG obliga a un temps no negligible d'aprenentatge.

Finalment, la inversió inicial en *hardware* i *software* sol ser relativament important, tot i que cada cop menor a causa de l'augment de potència i abaratiment dels ordinadors personals, que han esdevingut serioses alternatives a plataformes molt més costoses i de funcionament menys familiar per a la majoria de potencials usuaris.

Pel que fa als inconvenients tècnics podem esmentar la natural dificultat d'implantació en organitzacions grans i/o amb forta inèrcia en la seva estructuració de treball i els problemes derivats de la inexacta delimitació espacial, fortament dependents de què es vol i de quines bases es disposa; per exemple, donada una base digital de precisió equivalent a un mapa 1:800.000, no podem pretendre tenir una resposta vàlida a nivell de 10 m. Aquest aspecte, que exposat així resulta evident, sol ser totalment oblidat quan hom tracta les dades.

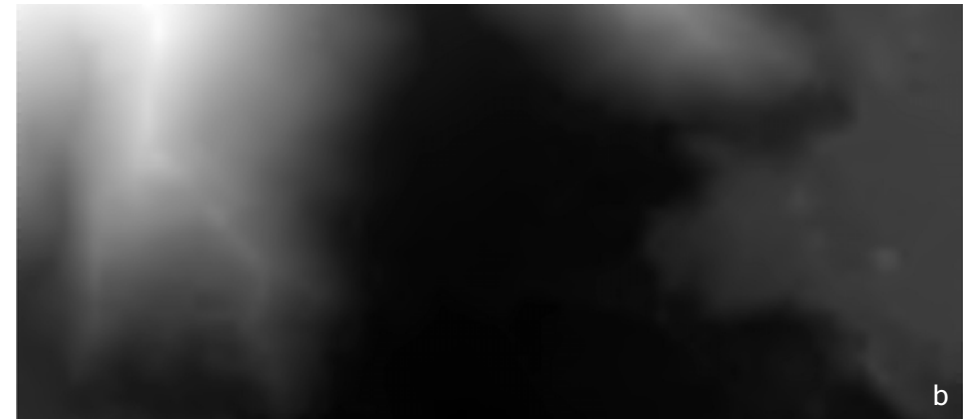
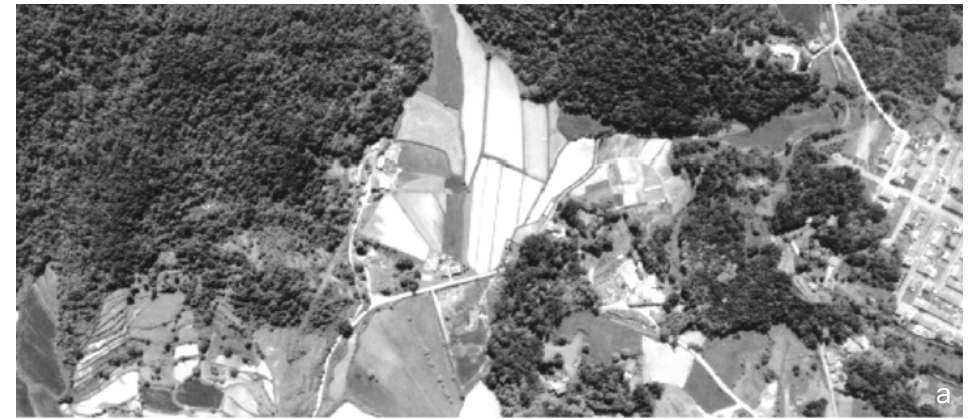
Pel que fa als inconvenients de tipus conceptual cal assenyalar (i sovint no es fa) que la utilització d'un SIG pot arribar a ser una perillosa forma de treballar allunyada de la realitat, en què no es recorri al treball de camp perquè es té una inconscient fe cega

en les dades que subministra l'ordinador. El professional del medi natural ha de veure la informació que proporciona un SIG com a complementària i potencialment tan subjecta a errors com qualsevol producte humà. Reprenent l'exemple del paràgraf anterior, la persona que consulta una base de dades de polígons de vegetació té la il·lusió que quan demana informació en un punt obté la «veritat» de l'ordinador, però caldria que fos conscient que la informació obtinguda: *a)* Pot ser errònia temàticament; *b)* pot ser errònia espacialment; *c)* té un error implícit que farà que prop d'una vora la fiabilitat decreixi (a una escala o a una altra les vores són borroses). En resum, doncs, cal tenir una actitud allunyada de la tecnocràcia i essencialment guiada pel sentit comú.

El treball amb SIG exigeix un canvi de mentalitat, en què el rigor espacial i temàtic ha de ser molt més elevat que el que solia imperar en molta cartografia naturalista; en cas contrari, la superposició d'informacions de diverses capes donarà lloc a falses interpretacions i generarà un soroll de fons que dificulta considerablement l'anàlisi de les dades. Afortunadament, les pròpies eines associades al món dels SIG ajuden en aquesta tasca: la disponibilitat d'imatges fotogràfiques o de sensors remots correctament georeferenciades permeten comparar directament les dades de treball amb una utilíssima visió fotogràfica de l'entorn. Per altra banda, els receptors GPS (per *global positioning system*) reforcen el lligam entre el treball de camp i les dades i permetent una integració directa i altament fiable en molts casos reals.

### Alguns exemples finals

Un SIG pot oferir un gran ventall d'informació i possibilitats d'anàlisi, fins i



tot a partir de conjunts de dades relativament modestos. Per exemple, suposem que disposem d'un MDE i d'un mapa de vegetació i usos del sòl. A més de la informació directa que podem extreure de cadascuna d'aquestes dues capes (altitud i vegetació/ús del sòl en qualsevol punt, quines zones són a una certa altitud o presenten uns certs tipus de vegetació/ús del sòl), molts SIG podran oferir-nos, entre d'altres informacions:

#### A partir del MDE:

- \* Pendents.
- \* Orientacions.
- \* Xarxa hidrica teòrica.
- \* Models de radiació solar.
- \* Punts des d'on es veu una estructura o àrees visibles des d'un cert punt.
- \* Superfícies (globals i en tant per cent), localitzacions, etc d'àrees de pendents, orientacions,... d'especial interès, per reclassificació de les dades anteriors.

#### A partir del mapa de vegetació i usos del sòl:

- \* Superfícies (globals i en tant per cent), localitzacions, etc. d'àrees d'usos d'interès.

- \* Nous mapes de reagrupació d'usos.

#### A partir de la combinació de les dues capes:

- \* Visió 3D de la distribució dels usos o de qualsevol ús en concret.
- \* Anàlisi de la distribució de qualsevol formació vegetal en funció de l'altitud, pendent, orientació, etc.
- \* Avaluació primària del risc d'erosió.
- \* Avaluació primària del risc d'incendi.

Com és fàcil d'imaginar, aquestes possibilitats augmenten ràpidament en disposar d'altres fonts d'informació, com ara un mapa litològic (estudis geobotànics), un de vegetació i usos del sòl més antic (estudis de dinàmica de la vegetació), un cens de fauna (distribució per hàbitats), etc.

A la figura 2 hem representat alguns tipus de dades habitualment disponibles en un SIG.

## Bibliografia

La següent llista pretén recollir algunes obres de referència sobre SIG que poden servir per a aprofundir en allò que s'ha

Some typical examples of information stored in a GIS. (a) Orthoimage: raster file resulting from georeferencing an aerial photograph or a remote sensing image; it is useful for photointerpretation tasks, for digital analysis, and to provide a cartographic background of photographic nature to be used together with other data layers. (b) Digital elevation model: raster file where each cell contains height data (on this example light tones correspond to higher heights, while darker tones correspond to the lower ones); it is useful to know the height of any point, to obtain derived parameters such as slope or aspect, to perform watershed analysis, etc. (c) Thematic map of categorical nature: vector file where each area has been delimited according to its different attributes (in this example, different shades of grey correspond to different vegetation and land-use categories).

exposat en aquest article. La llista també inclou algunes referències relatives a matèries en estreta relació amb els SIG, com ara la teledetecció, el processament d'imatges o les bases de dades.

- AANGEENBRUG, R. T. 1990. A critique of GIS. In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild & D. W. Rhind. Ed.) Vol 1. Longman Scientific & Technical. Essex. p. 101-107.
- ALEGRE, P.; CARRERAS, J. M.; CAMARASA, J. M. & AMELL, O. 1983 *Una aplicació del programa M.A.P. a Catalunya*. Departament de Geografia de la Universitat Autònoma de Barcelona i Direcció General de Política Territorial de la Generalitat de Catalunya. 160 p.
- ARBOL, R.; VIÑAS, O.; CAMARASA, J. M. & PALÀ, V. 1986. *Mapa d'usos del sòl de Catalunya a partir de dades del satèl·lit LANDSAT-2*. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona. 154 p. + 1 mapa.
- ARONOFF, S. 1989. *Geographic Information Systems. A Management Perspective*. WDL Publications. Ottawa. 294 p.
- BARIOU, R.; LÉCAMUS, D. & LE HENAFF, F. 1985. *Indices de végétation*. Presses Universitaires de Rennes 2. Rennes. 185 p.
- BOSQUE SENDRA, J. 1992. *Sistemas de información geográfica*. Rialp. Madrid. 453 p.
- BURROUGH, P. A. 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Clarendon Press. Oxford. 193 p.
- CAMPBELL, J. B. 1987. *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press. N.Y.
- CEBRIÁN, J. A. 1992. *Información geográfica y sistemas de información geográfica (SIGs)*. Servicio de publicaciones. Universidad de Cantabria. Santander. 85 p.
- CHUVIECO, E. 1990. *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp. Madrid. p. 325-368.
- COMAS, D. & RUIZ, E. 1994. *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*. Ariel. Barcelona. 295 p.
- DATE, C.J. 1993. *Introducción a los sistemas de bases de datos*. Addison-Wesley Iberoamericana. México. 860 p.
- GONZÁLEZ, R. C. & WHINTZ, P. 1987. *Digital Image Processing*. Addison Wesley. N.Y. 503 p.
- GUTIÉRREZ PUEBLA, J. & GOULD, M. 1994. *SIG: Sistemas de información geográfica*. Síntesis. Madrid. 251 p.
- JACKSON, M.J. & WOODSFORD, P.A. 1991. GIS data capture hardware and software. In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. (D. J. Maguire, M. F. Goodchild & D. W. Rhind. Ed.) Vol. I, Longman Scientific & Technical. Essex. p. 239-249.

- LAURINI, R. & TOMPSON, D. 1992. *Fundamentals of Spatial Information Systems*. Academic Press. Londres. 680 p.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons. N.Y. 721 p.
- LÓPEZ, J. 1985. Introducció al processament i anàlisi d'imatges digitals. Aplicacions biològiques. *Treballs de la Societat Catalana de Biologia*, 38:20-38. Barcelona.
- MAGUIRE, D. J. & DANGERMOND, J. 1991. The functionality of GIS. In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild & D. W. Rhind. Ed.) Vol. I, Longman Scientific & Technical. Essex. p. 319-335.
- MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F. & RHIND, D. W. (EDS.) 1991. *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. 2 Vol. Longman Scientific & Technical. Essex. 649+447 p.
- MAILING, D. H. 1991. Coordinate Systems and Map Projections for GIS. In: *Geographical Information Systems. Principles and Applications* (D. J. Maguire, M. F. Goodchild & D. W. Rhind. Ed.) Vol. I, Longman Scientific & Technical. Essex. p. 135-146.
- MATHER, P. M. 1987. *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. J. Wiley & Sons. Chichester. 352 p.
- MOLDES, F. J. 1995. *Tecnología de los sistemas de información geográfica*. Ra-Ma. Madrid. 190 p.
- OCAÑA, C.; ALEGRE, P.; CEBRIÁN, J.A. & SANCHE-COMINS, J. 1992. New techniques for geographic research (geographic information systems, automatic cartography and teledetection). In: *Geography in Spain (1970-1990). Spanish contribution to the 27th International Geographical Congress (IGU) Washington 1992*. (J. Bosque et al., Ed.) Real Sociedad Geográfica i Asociación de Geógrafos Españoles. Madrid. p. 217-226.
- PEUQUET, D. J. 1981. An examination of the techniques for reformatting digital cartographic data. Part 1: the raster-to-vector process. *Cartographica*, 18(1):34-48.
- PAVLIDIS, T. 1982. *Algorithms for graphics and image processing*. Springer-Verlag. Berlin. p. 180-189.
- TOMLIN, C.D. 1995. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J. 249 p.
- WILLIAMSON, A. N. 1992. Map Scanning for GIS Applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 58(8):1199-1202.

FIG. 2. Alguns exemples típics d'informació emmagatzemada en un SIG. (a) Ortoimatge: fitxer ràster resultat de georeferenciar una fotografia aèria o una imatge de teledetecció; resulta útil per a efectuar treballs de fotointerpretació o d'anàlisi digital, així com per a donar un fons cartogràfic de tipus fotogràfic a altres capes d'informació. (b) Model digital d'elevacions: fitxer ràster en què cada cel·la conté una dada altimètrica (en l'exemple els tons clars corresponen a les cotes més altes, mentre que els tons foscos corresponen a les més baixes); resulta útil per a conèixer l'altitud en qualsevol punt, així com per obtenir paràmetres derivats com el pendent, l'orientació, per a efectuar anàlisi de conques, etc. (c) Mapa temàtic de tipus categòric: fitxer vectorial en què es delimiten àrees amb diferents atributs (en l'exemple els diferents tons de gris corresponen a diferents tipus de vegetació i usos del sòl).

## Apèndix

### La introducció de dades en els SIG

Els SIG són una tecnologia amb una elevada potencialitat en molts camps... però cal disposar de dades per analitzar. En efecte, en qualsevol SIG, ràster o vectorial, la introducció de dades és, a part d'òbviament necessària, un aspecte important, ja que pot significar una part molt considerable del temps que hi dediquen persones i màquines. Els SIG basats en estructures ràster poden incorporar dades de la seva pròpia natura provinents de fonts molt diverses, des de la ja obsoleta entrada manual, cel·la a cel·la via teclat, a les imatges de sensors multispectrals (satèl·lit, avió), passant per les fotografies aèries i mapes escanejats, etc. (Burrough, 1986, p. 57-72; Aronoff, 1989, p. 103-123; Jackson & Woodsford, 1991; Williamson, 1992). En aquests darrers casos cal, per a la seva utilització al si del SIG, georeferenciar les dades mitjançant les transformacions adequades en cada cas, que solen ser del tipus «xarxa a xarxa» (*grid on grid*) (Mailing, 1991); d'aquesta manera podrem saber les coordenades en cada punt del mapa, calcular distàncies i àrees, etc. Els sistemes d'escàner, com ara els sensors de teledetecció o els escàners de taula, atribueixen a cada píxel un valor concret (radiància, transmitància densitomètrica, etc.), que pot ser utilitzat, directament o amb transformacions numèriques, com a informació útil (els índexs de vegetació usats en teledetecció en són un bon exemple: Bariou *et al.*, 1985). Tanmateix, és molt freqüent que, en lloc d'aquests valors numèrics, l'usuari desitgi, com a informació final, un ràster format per píxels amb valors corresponents a una etiqueta temàtica; el procés d'assignació des dels valors numèrics originals a les etiquetes sol fer-se mitjançant

processos específics de classificació (vegeu Burrough, 1986, p. 137-146 o Chuvieco, 1990, p. 325-368); en aquest cas cal notar que l'entrada d'atributs temàtics no cal realitzar-la de forma manual.

Els SIG basats en estructures vectorials poden incorporar dades a través de diverses vies; entre les més habituals podem esmentar la digitalització de mapes convencionals de punts, línies i polígons, sigui sobre una taula digitalitzadora o sobre la pantalla d'un ordinador (fotointerpretació d'ortofotos, escanajat i digitalització de mapes originalment analògics, etc.), i la importació directa de fitxers d'altres sistemes que utilitzen aquest tipus d'elements, com ara els sistemes de disseny assistit per ordinador (*Computer Assisted Design*, CAD). Una altra via d'entrada la constitueix el procés d'escanajat de mapes de línies, que, encara en format ràster, són esqueletitzades, i posteriorment resseguides formant vectors línia en processos semiautomàtics controlats per un operador (Burrough, 1986, p. 57-72; Aronoff, 1989, p. 103-123; Jackson & Woodsford, 1991; Williamson, 1992). En qualsevol d'aquests casos, per tal que les dades siguin fàcilment i plenament utilitzables en les tasques d'anàlisi del SIG, cal dotar-les d'estructura topològica, és a dir, cal definir les relacions espacials entre elles (Aronoff, 1989, pp. 174-177). Finalment, els receptors GPS, capaços de donar en temps real la nostra posició en qualsevol punt de la Terra que estigui raonablement lliure d'objectes sòlids al seu voltant, també són utilitzats en la introducció de dades en els SIG (punts d'inventari, traçat de carreteres, delimitació de polígons, etc.).

Afortunadament cada cop és més freqüent poder disposar de dades ja informatitzades i fàcilment incorporables a un SIG. En diversos països ja fa anys que l'administració pública prepara i distribueix bases topo-

gràfiques, de geologia, d'usos del sòl, etc. En aquests casos el cost per a l'usuari final pot arribar a ser realment baix, ja que, en ser les dades totalment digitals, la seva rèplica resulta molt barata. Als EUA, per exemple, l'administració n'assumeix la producció amb els recursos públics i no en pretén una explotació econòmica; a l'altra banda de la balança, l'administració d'alguns països europeus no només comercialitza les dades a preus pràcticament d'encàrrec exprés, sinó que converteix en delictes l'elaboració de bases cartogràfiques digitals fora dels canals establerts. A Catalunya, diverses entitats, com l'Institut Cartogràfic de Catalunya, la Mancomunitat de Municipis de l'Àrea Metropolitana de Barcelona, el Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca i el Departament de Medi Ambient de la Generalitat, etc. fa temps que estan produint material divers, d'elevada qualitat i cada cop més fàcilment incorporable a un SIG (quan la incorporació no és immediata); aquest material inclou bases altimètriques, usos del sòl, vols d'alt detall d'àmbit urbà, etc. També diversos instituts d'investigació i departaments universitaris estan elaborant informació diversa, com atlas forestals, mapes de vegetació, etc. Donat que aquest és un camp amb una dinàmica molt ràpida, no resulta possible fer-ne cap llistat aquí, per la qual cosa la persona interessada haurà d'explorar què hi ha disponible en el moment en què sorgeixi cada necessitat.