

*Introducción a los Sistemas de
Información Geográfica*

Introducción a los Sistemas de Información Geográfica
Copyright ©2016 Víctor Olaya

Versión revisada el 6 de agosto de 2016

Se concede permiso para copiar, distribuir o modificar esta obra bajo los términos expresados en la licencia Creative Common Atribución, la cual puede encontrarse en [www.creativecommons.org](http://creativecommons.org). La licencia se aplica a todo el texto, así como las imágenes creadas por el propio autor, que serán aquellas para las que no se especifique de modo explícito una distinta procedencia. Este libro puede descargarse y consultarse de forma libre en varios formatos, incluyendo formatos editables, en la dirección Web <http://victorolaya.com>.

Los nombre de productos o corporaciones que aparecen en el texto pueden constituir marcas registradas y se emplean sin otro afán que el meramente identificativo. Asimismo, la inclusión o no de uno de tales productos no expresa recomendación alguna por parte del autor.

VÍCTOR OLAYA

Introducción a los Sistemas de Información Geográfica

PRÓLOGO

Hace ahora más de cinco años que se publicó la primera versión de *Sistemas de Información Geográfica*, un libro libre sobre fundamentos de SIG en español, y apenas unos meses desde que apareció la segunda. El libro ha tenido una acogida excelente, y mi intención es seguir manteniéndolo actualizado en la medida que sea posible, reflejando los avances que, a buen seguro, van a producirse en el campo de los SIG.

Existe, no obstante, un obstáculo importante para que el libro alcance a todos los públicos: su tamaño. Por su completitud, y por la complejidad propia de la disciplina, el libro es un volumen de más de 800 páginas cargadas de detalle. La segunda versión se presenta en un único tomo, frente a los dos en que consistía la primera, pero aún así sigue quedando como una obra de consulta demasiado extensa para leerse de principio a fin. Para el lector que comienza a introducirse en el ámbito de los SIG y no busca especializarse, resulta un volumen intimidante y es, no hay duda, difícil de abordar.

Este libro intenta ser una alternativa a la obra completa, de tal forma que resulte más accesible pa-

ra quienes desean tener una perspectiva global de la disciplina de los SIG, sin entrar en detalles demasiado específicos. Es, básicamente, una versión resumida de aquel, pensada con la idea de usarse no como libro de consulta, sino como libro de lectura. Además de ser más breve, se presenta en un formato más adecuado para esta clase de propósito, con algunas modificaciones en su enfoque y con menos contenido gráfico.

He respetado en líneas generales la estructura de los capítulos, de modo que es fácil para el lector que desee profundizar en uno de ellos encontrar este en el libro completo. Desde ese punto de vista, puede entenderse este libro como una especie de «índice» de su hermano mayor, un índice, no obstante, prolífico y con suficiente información como ofrecer al lector una visión detallada del mundo de los SIG.

Este es también, por supuesto, un libro libre, que espero que progrese de una forma dinámica gracias a la contribución de sus lectores. Si encuentras cualquier error o quieres colaborar en mejorar estas páginas, no dudes en escribirme a volayaf@gmail.com.

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

¿QUÉ ES UN SIG?

La mayor parte de la información que manejamos en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada. Es decir, se trata de información a la cual puede asignarse una posición geográfica, y es por tanto información que viene acompañada de otra información adicional relativa a su localización.

Un **Sistema de Información Geográfica** (SIG) es una herramienta para trabajar con información georreferenciada. En particular, un SIG es un sistema que permite la realización de las siguientes operaciones:

- **Lectura, edición, almacenamiento** y, en términos generales, **gestión** de datos espaciales.
- **Análisis** de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la **componente espacial** de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la **componente temática** (el valor o el elemento en sí).
- Generación de **documentos** tales como mapas, informes, gráficos, etc.

Un SIG representa un paso más allá de los mapas

clásicos. Mientras que un mapa es una representación de un conjunto de datos espaciales, y aunque esta representación resulta de enorme importancia, en el entorno de un SIG no es sino un elemento más de un conjunto de ellos. El SIG no incluye solo los datos y la representación, sino también las operaciones que pueden hacerse sobre el mapa, que no son ajenas a este sino partes igualmente de todo ese sistema.

Un SIG es una herramienta versátil y de amplio alcance, y hoy día la gran mayoría de disciplinas se benefician del uso de SIG de uno u otro modo. Una de las principales razones por las que esto sucede es el **carácter integrador** de los SIG. Los siguientes son algunos de los contextos principales en los que un SIG ejerce tal función integradora.

- **SIG como integrador de información.** Un nexo común entre la mayoría de disciplinas es el hecho de que sus objetos de estudio están asociados a una localización en el espacio. Esto va a permitir combinarlas y obtener resultados a partir de un análisis común. El SIG es, en este contexto, el marco necesario en el que incorporar esa información georreferenciada y trabajar con ella.
- **SIG como integrador de tecnologías.** Una gran parte de las tecnologías que han surgido en los últimos años (y seguramente de las que surjan en los próximos) se centran en el aprovechamiento de la información espacial, y están conectadas en mayor o menor medida a un SIG para ampliar su alcance y sus capacidades. Por su posición central en el conjunto de todas las tecnologías, los SIG cumplen además un papel de unión entre ellas, conectándolas y permitiendo una relación fluida alrededor de las funcionalidades del propio SIG.

- **SIG como integrador de personas.** Las funciones básicas que un SIG ha de cumplir cubren en realidad un rango amplio de trabajo, y engloban las necesidades de usuarios que con anterioridad no tenían entre sí un marco de trabajo común tan definido. Esto tiene como consecuencia que existe una mejor coordinación entre ellos, pues es la propia herramienta quien establece las características de las relaciones existentes, y estas no dependen ya únicamente del propio ámbito de aplicación.
- **SIG como integrador de teorías y fundamentos.** En un principio, podemos entender un SIG como la unión de dos ciencias: la geografía y la informática. Sin embargo, un análisis más detallado nos revela que un SIG incorpora elementos de muchas ciencias distintas, como pueden ser las disciplinas relacionadas con la tecnología y el manejo de información (informática, diseño de bases de datos, tratamiento digital de imágenes), las dedicadas al estudio de la Tierra desde un punto de vista físico (geología, la geología, la oceanografía, la ecología), las dedicadas al estudio de la Tierra desde un punto de vista social y humano (antropología, geografía, sociología), las dedicadas al estudio del entendimiento humano (ciencias del conocimiento, psicología) o las disciplinas que tradicionalmente han realizado una integración de conocimientos de otros ámbitos distintos, entre las que cabe destacar la geografía.
El término **geomática**, formado a partir de los vocablos *geografía* e *informática*, se emplea con frecuencia para hacer mención a todo ese grupo de ciencias relacionadas con los SIG.

Con todo lo anterior, se tiene que SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e

información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

Desde otro punto de vista, un SIG puede considerarse compuesto de cinco bloques fundamentales.

- **Datos.** Los datos son necesarios para hacer que el resto de componentes de un SIG cobre sentido y puedan ejercer su papel en el sistema. La información geográfica, la verdadera razón de ser los SIG, reside en los datos, y es por ello que el conocimiento exhaustivo de los datos, su naturaleza, su procedencia, su calidad, así como su gestión y almacenamiento, resulta obligado para una buena comprensión los propios SIG.
- **Análisis.** El análisis es una las funcionalidades básicas de los SIG, y una de las razones fundamentales que llevaron al desarrollo de estos. Un ordenador es una herramienta con enorme capacidad de cálculo, y esta puede aplicarse a los datos espaciales para obtener resultados de muy diversa índole.
En mayor o menor medida, un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Las ventajas de la incorporación de todos estos procesos en una única herramienta, el SIG, van desde la **automatización de tareas** a la aparición de nuevos procesos que producen resultados que no podrían ser obtenidos de otro modo.
- **Visualización.** Cualquier tipo de información puede ser representada de forma gráfica, lo cual facilita la interpretación de dicha información o parte de esta. En el caso particular de la información geográfica, la visualización no solo es una forma más de trabajar con esa información, sino que resulta la

forma principal, por ser aquella a la que estamos más acostumbrados gracias al uso de mapas.

Al contrario que un mapa, que de por sí es de naturaleza gráfica, en un SIG trabajamos con datos de tipo puramente numérico. Para poder presentar una utilidad similar a la de un mapa, un SIG debe incluir capacidades que generen representaciones visuales a partir de esos datos numéricos.

La visualización de la información geográfica se rige por los mismos conceptos y principios que se emplean para la confección de cartografía impresa, y estos deben ser conocidos por el usuario de SIG, ya que una de las tareas de este es el diseño cartográfico y las preparación de los elementos de visualización para poder realizar su trabajo sobre las representaciones creadas.

- **Tecnología.** Se incluyen en este elemento tanto el *hardware* sobre el que se ejecutan las aplicaciones SIG, como dichas aplicaciones, es decir el *software* SIG. Además de la propia plataforma, el *hardware* incluye una serie de periféricos habituales en el trabajo con SIG, como son los periféricos para entrada de datos geográficos y creación de cartografía.
- **Factor organizativo.** Engloba los elementos relativos a la coordinación entre personas, datos y tecnología, o la comunicación entre ellos, entre otros aspectos. Con la creciente complejidad de los SIG, la gestión de las relaciones entre sus elementos es cada vez más importante.

A lo largo de este libro, detallaremos cada uno de estos bloques en los capítulos correspondientes.

HISTORIA DE LOS SIG

El desarrollo sufrido por los SIG desde sus orígenes hasta nuestros días es enorme. La popularización de las tecnologías y los esfuerzos de desarrollo llevados a cabo por un amplio abanico de ciencias beneficiarias de los SIG, todos han contribuido a redefinir la disciplina e incorporar elementos impensables entonces.

Podemos situar el origen de los SIG al inicio de la década de los **60**, como resultado de unos factores que convergen para dar lugar al desarrollo de estos. Estos factores son principalmente dos: la **necesidad creciente de información geográfica** y de una gestión y uso óptimo esta, y la **aparición de los primeros computadores**.

Las bases para la futura aparición de los SIG las encontramos algunos años antes de esa década de los 60, con el desarrollo de nuevos enfoques en cartografía, tales como la **geografía cuantitativa**, que parecen predecir las necesidades futuras que un manejo informatizado de esta traerá.

La primera experiencia relevante en la que se combinan geografía e informática la encontramos en 1959, cuando Waldo Tobler define los principios de un sis-

tema denominado MIMO (map in–map out) con la finalidad de aplicar los ordenadores al campo de la cartografía. En él, establece los principios básicos para la creación de datos geográficos, su codificación, análisis y representación dentro de un sistema informatizado.

El primer Sistema de Información Geográfica formalmente desarrollado aparece en Canadá. Este sistema, denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), fue desarrollado a principios de los 60 por Roger Tomlinson, popularmente conocido como el «padre del SIG».

A mediados de los 60, las aplicaciones SYMAP y GRID sientan respectivamente las bases de los dos principales enfoques a la hora de manejar información geográfica: el enfoque **raster** y el enfoque **vectorial**. Ambas alternativas serán explicadas con detalle más adelante en este libro. Los conceptos básicos para el análisis dentro del SIG ráster los establece poco después Dana Tomlin, desarrollando lo que se conoce como **álgebra de mapas**.

Durante los años sesenta, se produce un gran desarrollo de los SIG a partir de esos elementos iniciales, y el SIG comienza a incorporarse a la comunidad cartográfica, dejando de ser una herramienta experimental.

La evolución de los SIG desde entonces recorre sucesivas etapas, avanzando muy rápidamente ante la influencia de numerosos factores externos. Esta evolución tiene lugar en el propio SIG como disciplina, en las tecnologías que lo sustentan, en los datos, así como en las técnicas y formulaciones.

LA EVOLUCIÓN DE LOS SIG COMO DISCIPLINA

Los SIG eran en origen una mera combinación de elementos de cartografía cuantitativa, enlazados con los sistemas informáticos de la época. Se trataba de un territorio propio de cartógrafos y geógrafos que intentaban adaptar sus conocimientos y necesidades a las tecnologías que por aquel entonces comenzaban a surgir. No obstante, desde aquellos orígenes los cambios han sido muy grandes, y se han incorporado al ámbito de los SIG un gran número de otras disciplinas cuya aportación e influencia puede ser equivalente o incluso superior a la de la cartografía o la geografía.

Coincidiendo con la etapa inicial del desarrollo de los SIG, empieza a aparecer una preocupación por el entorno que tiene consecuencias muy favorables para el desarrollo de todas las ciencias relacionadas, la gran mayoría de las cuales son o serán usuarias directas de SIG. El SIG comienza a integrarse paulatinamente en las tareas de **gestión del medio**, como un apoyo imprescindible a la hora de analizar este.

Al principio de la década de los 70, siendo ya claro que los SIG son herramientas con gran futuro, aparecen no solo los esfuerzos de desarrollo y estabilización de la disciplina, sino todos los restantes que dan entidad propia a la prometedora ciencia de la información geográfica con base informática. Comienzan a celebrarse conferencias y simposios sobre SIG, y estos pasan a formar parte de los *curricula* universitarios. En los años 80, se consolidan las revistas y foros especializados, que habrán de llevar la disciplina a un público más amplio.

En el aspecto comercial, la industria del SIG se consolida también en los años 70. **ESRI** (Environmental Systems Research Institute), empresa pionera y

líder del sector hasta el día de hoy, se funda en 1969, y sus productos tienen gran importancia a la hora de convertir los SIG en un elemento de consumo. El primer SIG de código abierto, **GRASS** (Geographic Resources Analysis Support System), aparece en 1985.

El mayor avance en la incorporación de los SIG a entornos no profesionales tiene lugar en la primera década del siglo XXI, con la aparición de servicios de cartografía tales como *Google Maps*. La popularización de los **navegadores GPS**, que incorporan tanto elementos de representación como de análisis propios de los SIG, son otro buen ejemplo de la proliferación del SIG entre un público no especializado.

LA EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

Tres son los bloques principales del desarrollo informático con una influencia más marcada en el campo de los Sistemas de Información Geográfica:

- **Salidas gráficas.** La evolución de las capacidades gráficas, intensa desde sus inicios hasta nuestros días y aún muy activa, ha sido seguida de cerca por los SIG, que progresivamente van incorporando mejoras tanto en la representación en pantalla como en la generación de mapas impresos.
- **Almacenamiento y acceso de datos.** El aumento en el tamaño de los datos manejados en el SIG ha debido acompañarse de mejoras en la capacidad de almacenamiento, así como en la de lectura, para poder garantizar un uso fluido.
- **Entrada de datos.** Los datos geográficos utilizados en los primeros años de los SIG eran datos en papel que se digitalizaban y almacenaban mecánicamente

en tarjetas perforadas en un único proceso mecánico. Desde esos sistemas mecánicos de tarjetas hasta los modernos equipos, la aparición de *scanners* de gran precisión y técnicas de digitalización automáticas, entre otros, ha cambiado completamente el ámbito de la entrada de datos para su uso en un SIG.

Además del avance de estos factores, la evolución general de los ordenadores afecta a todos los elementos de *software* que se ejecutan sobre ellos. De las grandes computadoras se pasa a los ordenadores personales, y los programas tales como los SIG realizan también esa transición de una a otra plataforma.

La elaboración y análisis de cartografía se convierte a finales de los años 80 en una tarea que puede ya llevarse a cabo en equipos personales (PC) de bajo coste, lejos de las grandes máquinas y equipos dedicados de alto coste.

La evolución de las plataformas no se detiene ahí. Las tendencias actuales apuntan a llevar los SIG de forma genérica a plataformas móviles tales como teléfonos o tabletas, especialmente indicadas para la toma de datos en campo. La combinación de estos últimos con las tecnologías de posicionamiento global como el GPS se demuestra altamente práctica en este aspecto.

La aparición de Internet es un hecho que ha modificado todos los aspectos de la sociedad actual, estén relacionados o no con ámbito científico. El primer uso relacionado con el SIG o la distribución de cartografía lo encontramos en 1993, con la aparición de *Xerox PARC*, el primer servidor de mapas. El primer atlas digital en linea, el *Atlas Nacional de Canadá*, se encuentra disponible desde 1994. Mas recientemente, ya en este siglo, los concepto de la Web 2.0 se adaptan al

ámbito de los SIG y facilitan la aparición de lo que se conoce como **Web Mapping**.

LA EVOLUCIÓN DE LOS DATOS

Las primeras bases de datos geográficas contenían mapas escaneados y elementos digitalizados en base a estos. A partir de este punto, van apareciendo nuevas fuentes de datos cuya estructura es más adecuada para su tratamiento informatizado, y al tiempo que los SIG se adaptan a estas, surge una relación bidireccional que resulta beneficiosa para ambos.

Un avance primordial en este sentido lo constituye el lanzamiento de los primeros **satélites de observación terrestre**. Las técnicas existentes para la toma de fotografías aéreas, desarrolladas principalmente con fines militares durante la Primera Guerra Mundial (aunque iniciadas a mitad del siglo XIX con la toma de fotografías desde globos aerostáticos), pasan a aplicarse a escala global con la aparición de satélites destinados a estos efectos. En 1980 se funda SPOT, la primera compañía mundial en ofrecer con carácter comercial imágenes procedentes de satélite para toda la superficie terrestre.

Las tecnologías de posicionamiento y localización son otra fuente de datos de primer orden. En 1981, el sistema GPS pasa a ser plenamente operativo, y en 2000 se amplía la precisión de este para uso civil.

Al igual que las aplicaciones, los distintos tipos de datos geográficos digitales se van asentando y popularizando, recibiendo progresivamente más atención y medios. El Servicio Geográfico Estadounidense (USGS) publica en 1976 los primeros **Modelos Digitales de Elevaciones** (MDE), en respuesta a la gran impor-

tancia que este tipo de dato tiene dentro del nuevo contexto del análisis geográfico. En el año 2000 se publican los datos de la *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), con información altitudinal de un 80 % de la superficie terrestre a una resolución de un segundo de arco (aproximadamente, 30 metros).

La aparición de nuevas técnicas tales como el LiDAR (ver ??) abre nuevos caminos en cuanto a la precisión que puede obtenerse en la caracterización del terreno, posibilitando nuevos usos y análisis antes no planteados.

La evolución de los datos no es solo una evolución técnica, sino también de carácter social y organizativo. Se empieza a entender que resulta necesario formular estrategias adecuadas para la gestión de los datos espaciales, y se desarrollan las denominadas **Infraestructuras de Datos Espaciales** (IDE). El ejemplo más destacado de estas es la IDE Nacional de los Estados Unidos (NSDI), de 1994. En Europa, la directiva INSPIRE, de 2007, pretende la creación de una infraestructura similar.

Muchos de estos desarrollos y actividades se adhieren a las especificaciones establecidas por el *Open GIS Consortium* (OGC), un consorcio internacional fundado en 1994 para **homogeneizar** el empleo y difusión de los datos geográficos.

LA EVOLUCIÓN DE LAS TÉCNICAS Y FORMULACIONES

Una vez que se implementan los primeros SIG y se suplen las necesidades de análisis y gestión de datos espaciales que motivaron su aparición, comienza el proceso de desarrollar nuevas técnicas y planteamientos que permiten ir más allá en dicho análisis.

Los antecedentes del análisis espacial son relativamente recientes. En 1854 John Snow realizó la que puede considerarse como una de las primeras experiencias cartográficas analíticas, al utilizar mapas de puntos para efectuar sus deducciones y localizar en Inglaterra la fuente de un brote de cólera.

En su libro *Design with Nature* (1969), Ian McHarg define los elementos básicos de la **superposición y combinación de mapas**, que, como veremos más adelante, son los que se aplican tanto en el análisis como en la visualización de las distintas *capas* de datos geográficos en un SIG.

Un desarrollo especialmente relevante es el experimentado por el **análisis del relieve**, una disciplina que con la aparición de los SIG sufre un salto cualitativo muy importante. La orografía clásica, con un enfoque tradicionalmente sustentado en la geología y el análisis geomorfológico, va dando lugar a una ciencia cada vez más cuantitativa centrada en el análisis morfométrico del relieve.

Junto con la componente analítica, otros elementos de la práctica cartográfica evolucionan de forma similar. En 1819, Pierre Charles Dupin crea el primer **mapa de coropletas**. Con la llegada de los SIG, este tipo de mapas se convertirán en una forma de representación muy popular.

El avance en el desarrollo de las aplicaciones de diseño asistido por ordenador (CAD), y en general de las representaciones gráficas por ordenador, impulsó igualmente la aparición y evolución posterior de una nueva disciplina: la geometría computacional. Sobre esta se fundamenta el análisis vectorial dentro de un SIG, y también parte de los mecanismos que este usa para la representación gráfica de elementos.

FUNDAMENTOS CARTOGRÁFICOS Y GEODÉSICOS

CONCEPTOS GEODÉSICOS BÁSICOS

La característica principal de la información georreferenciada es que tiene una **localización en el espacio**, particularmente en el espacio terrestre. Esta localización se ha de dar por medio de unas **coordenadas** que la definan de forma adecuada, lo cual implica la necesidad de establecer un sistema en base al cual expresar dichas coordenadas.

La **geodesia** es la ciencia encargada de proveer el marco teórico en el que fundamentar lo anterior, y su objeto de estudio es **la forma de la Tierra**. La geodesia, en sus diversas ramas, proporciona métodos y conceptos que permiten la utilización rigurosa de coordenadas.

La necesidad del estudio geodésico surge por el hecho de que la Tierra no es plana, y cuando el territorio que pretendemos estudiar es lo suficientemente extenso, la curvatura de la Tierra no puede ser ignorada. Este es el caso que vamos a encontrar cuando trabajemos con un SIG, y es por ello que los SIG implementan los

elementos necesarios para poder efectuar un manejo de la información geográfica riguroso y acorde con los conceptos de la geodesia.

Uno de los objetivos principales de la geodesia es establecer un sistema de referencia y definir un conjunto de puntos (conocidos como **vértices geodésicos**) cuyas coordenadas en dicho sistema sean conocidas con una precisión elevada. Posteriormente, y en base a esos puntos, los cuales forman una **red geodésica**, se pueden calcular las coordenadas de cualquier punto en el sistema de referencia definido.

Superficies de referencia

Dos conceptos básicos para esta tarea: el **elipsoide de referencia** y el **geoide**.

La Tierra tiene forma esférica, aunque no es una esfera perfecta, sino que está achatada, constituyendo lo que se conoce como **elipsoide**. Sobre un elipsoide, el radio de la Tierra ya no es constante, y depende del emplazamiento. Asimilar la Tierra a un elipsoide es más preciso que suponer la Tierra con una forma perfectamente esférica, y es necesario a la hora de elaborar cartografía de zonas no muy extensas.

Una vez que se dispone de una expresión teórica para la forma de la Tierra, el siguiente paso es la determinación de los parámetros que definen esta. En el caso de utilizar la esfera, hay que calcular su radio. En el caso de asumir el elipsoide como forma de referencia, deben determinarse las medidas de los semiejes menor y mayor.

Por razones históricas, existen numerosos elipsoides, derivados del trabajo de los geodestas en diferentes épocas y lugares. Los primeros elipsoides generales,

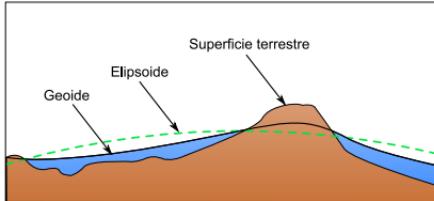


Figura 3.1: Tres superficies fundamentales: superficie real de la Tierra, geoide y elipsoide (Adaptado de Wikipedia).

que permiten ser usados en toda la superficie terrestre, aparecen hace aproximadamente un siglo, con objeto de disponer de una referencia internacional que facilite el uso de cartografía en las distintas zonas del planeta. El **elipsoide WGS–84** es uno de los más empleados en la actualidad, ya que es el utilizado por el sistema GPS (apartado 5).

El geoide es la otra superficie de referencia, definida como la superficie tridimensional en cuyos puntos la atracción gravitatoria es constante. Se trata de una superficie equipotencial que resulta de suponer los océanos en reposo y a un nivel medio y prolongar estos por debajo de la superficie terrestre.

Al igual que en el caso de los elipsoides, existen diversos geoides de referencia, y estos no son constantes en el tiempo sino que evolucionan para adaptarse a las modificaciones que tienen lugar sobre la superficie terrestre.

La figura 3.1 muestra una comparación esquemática entre las tres superficies: superficie real de la Tierra, geoide y elipsoide.

En un elipsoide **general**, tanto la posición de su centro de gravedad como de su plano ecuatorial coinciden con los terrestres. Por el contrario, cuando el elipsoide es **local**, estas propiedades no han de cum-

plirse necesariamente, y el elipsoide a solas resulta insuficiente, ya que carecemos de información sobre su posicionamiento con respecto a la superficie terrestre.

Surge así el concepto de **datum**, que es el conjunto formado por una superficie de referencia (el elipsoide) y un punto en el que «enlazar» este al geoide. Este punto se denomina **punto fundamental**, y en él el elipsoide es tangente al geoide. La vertical al geoide y al elipsoide son idénticas en el punto fundamental.

Para un mismo elipsoide pueden utilizarse distintos puntos fundamentales, que darán lugar a distintos datum y a distintas coordenadas para un mismo punto.

Sistemas de coordenadas

Una vez hemos definido un modelo para definir la forma de la Tierra, podemos establecer un sistema de codificar cada una de las posiciones sobre su superficie y asignar a estas las correspondientes coordenadas. Para ello, encontramos dos opciones: utilizar los elementos de la **geometría esférica** y con estos definir el sistema de referencia, o utilizar la *geometría plana*, para lo cual será necesario un mecanismo de **proyección** de coordenadas que permita situar los elementos de la superficie del elipsoide sobre una superficie plana.

El sistema de *coordenadas geográficas* es un sistema de coordenadas esféricas mediante el cual un punto se localiza con dos valores angulares: **latitud** y **longitud**. Las líneas de igual latitud o longitud se denominan **paralelos** y **meridianos** respectivamente.

Las coordenadas geográficas resultan de gran utilidad, especialmente cuando se trabaja con grandes regiones. No obstante, no se trata de un sistema cartesiano, y tareas como la medición de áreas o distancias

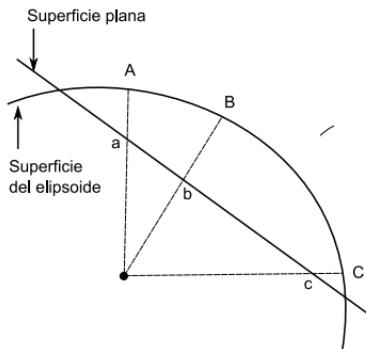


Figura 3.2: Esquema del concepto de proyección. A los puntos A, B y C sobre la superficie del elipsoide se les asocian equivalentes a, b y c sobre un plano.

es mucho más complicada. Para poder crear cartografía y simplificar gran número de operaciones posteriores, necesitamos coordenadas cartesianas. El proceso de asignar una coordenada plana a cada punto de la superficie de la Tierra (que no es plana) se conoce como **proyección cartográfica**.

La superficie de la esfera no es **desarrollable**, es decir, no puede convertirse en un plano. Por ello, es necesario disponer de una metodología para pasar puntos desde la superficie curva al plano, tal y como el que se muestra en la figura 3.2.

En el caso de la figura, los puntos se proyectan directamente sobre un plano. Otra opción es proyectarlos sobre una superficie tridimensional que, al contrario que la esfera, sea desarrollable. Las más habituales son el cilindro y el cono, que dan lugar a las **proyecciones cónicas y cilíndricas**.

Puede apreciarse en la figura que se producen distorsiones al realizar la proyección. Por ejemplo, la distancia entre los puntos A y B no es igual a la existente entre los

puntos *a* y *b*. Con independencia de las características propias de la proyección, siempre existen distorsiones, por ser la de la esfera una superficie no desarrollable. Estas distorsiones se conocen como **anamorfosis**.

Según las propiedades métricas que se conserven, las proyecciones pueden ser **equiárea** (mantienen una escala constante), **conformes** (mantienen los ángulos y la forma de los objetos) o **equidistantes** (mantienen las distancias).

La elección de una u otra proyección es función de las necesidades concretas de cada caso de uso.

En la actualidad, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la **proyección universal transversa de Mercator**, la cual da lugar al **sistema de coordenadas UTM**. Este sistema no es simplemente una proyección, sino un sistema completo para cartografiar la práctica totalidad de la Tierra. Para ello, esta se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadricula y se aplica una proyección y unos parámetros geodésicos concretos a cada una de dichas zonas. En su forma actual, emplea un único elipsoide (WGS-84).

Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontramos.

La cuadricula UTM tiene un total de 60 husos numerados entre 1 y 60, cada uno de los cuales abarca una amplitud de 6° de longitud. El huso 1 se sitúa entre los 180° y 174° O, y la numeración avanza hacia el Este.

En latitud, cada huso se divide en 20 zonas, que van desde los 80° S hasta los 84° N. Estas se codifican con letras desde la C a la X, no utilizándose las letras I y O por su similitud con los dígitos 1 y 0. Cada

zona abarca 8 grados de longitud, excepto la X que se prolonga unos 4 grados adicionales.

Una zona UTM se localiza, por tanto, **con un número y una letra**, y es en función de la zona como posteriormente se dan las coordenadas que localizan un punto. Estas coordenadas se expresan en metros y expresan la distancia entre el punto y el origen de la zona UTM en concreto. El origen de la zona se sitúa en el punto de corte entre el meridiano central de la zona y el ecuador.

Para evitar la aparición de números negativos, se considera que el origen no tiene una coordenada X de 0 metros, sino de 500000, y una coordenada Y de 10000000 metros, lo cual hace que todas las coordenadas referidas a él sean positivas.

Transformación y conversión de coordenadas

Una situación muy habitual en el trabajo con un SIG es disponer de cartografía en **varios sistemas de coordenadas**, o bien en un mismo sistema pero con parámetros diferentes (por ejemplo, diferente datum). Para poder emplear toda esa cartografía de forma conjunta, resulta necesario trabajar en un sistema único y bien definido, lo cual hace necesario convertir al menos una parte de ella. Cuando el datum es distinto en los sistemas de origen y destino, la **conversión de coordenadas** se conoce como **transformación de coordenadas**.

Las operaciones de transformación y conversión aparecen en los SIG como funcionalidades que permiten modificar los datos geográficos, reemplazando sus coordenadas por coordenadas en otro sistema de coordenadas. Igualmente, aparecen como funcionalidades

de representación, permitiendo la conversión «**al vuelo**», es decir, en tiempo real. En este caso, un dato en un sistema de coordenadas se puede representar en cualquier otro sin necesidad de una conversión previa, con lo que puede usarse conjuntamente con datos en un sistema de coordenadas distinto.

Para facilitar el uso de sistemas de referencia, existen proyectos de codificación de estos, de forma que cada sistema existente puede identificarse de forma sencilla mediante un código. El más extendido de estos es el sistema de codificación **EPSG**.

CONCEPTOS CARTOGRÁFICOS BÁSICOS

De entre los conceptos fundamentales de la cartografía que todo usuario de SIG ha de conocer, destaca el de **escala**. La escala es la **relación de tamaño** existente entre el mapa que se obtiene al desarrollar nuestra superficie de proyección (de tamaño acorde con el objeto proyectado, esto es la Tierra) y el que finalmente manejamos, de tamaño más reducido. Conociendo esta relación podemos conocer las verdaderas magnitudes de los elementos que vemos en el mapa, ya que podemos convertir las medidas hechas sobre el mapa en medidas reales. Es importante recordar que esas medidas no son tan «reales», puesto que la propia proyección las ha distorsionado —lo cual no debe olvidarse—, pero sí que son medidas en la escala original del objeto cartografiado.

La escala se expresa habitualmente como un denominador que relaciona una distancia medida en un mapa y la distancia que esta medida representa en la realidad. Por ejemplo, una escala 1:50000 quiere decir que 1 centímetro en un mapa equivale a 50000 centí-

metros en la realidad, es decir a 500 metros. Este valor se conoce como **escala numérica**.

Independientemente del tipo de proyección, la escala es completamente cierta únicamente en determinadas partes del mapa. En otros puntos de este, la escala variaría. La relación entre la escala en esos puntos y la escala numérica se conoce como **factor de escala**.

Aunque tradicionalmente se entiende la escala como un concepto asociado a la representación, los datos geográficos tienen una escala inherente que no es función de dicha representación, sino del detalle con que han sido tomados. En este sentido es más conveniente entender la escala como un elemento relacionado con la **resolución** de los datos, es decir, con el **tamaño mínimo cartografiado**. Esta concepción no es en absoluto propia de los SIG, ya que deriva de las representaciones clásicas y los mapas impresos. Se sabe que el tamaño mínimo que el ojo humano es capaz de diferenciar es del orden de 0,2 mm. Aplicando a este valor la escala a la que queremos crear un mapa, tendremos la mínima distancia sobre el terreno que debe medirse.

Es importante ser consciente de la limitación que la escala considerada a la hora de la toma de datos (conocida como **escala operacional**) impone, especialmente en el contexto de un SIG. En un SIG, podemos aumentar el tamaño en pantalla de una cierta información geográfica, variando la escala de representación (también conocida como **escala cartográfica**), pero ello no modifica la escala operacional. Por mucho que ampliemos no vamos a ver más detalles, ya que para ello sería necesario tomar más datos.

Un tipo de datos particulares con los que se trabaja en un SIG, los datos *ráster*, tienen a su vez un parámetro de resolución (el **tamaño de celda**) ligado

a la escala. Veremos más al respecto en el capítulo 4.

Relacionado con el concepto de escala encontramos la denominada **generalización cartográfica**. Generalizar implicar expresar alguna idea o información de forma más resumida, de tal modo que esta sea comprensible y pueda aprovecharse de la mejor manera posible. La generalización es necesaria en un SIG para representar datos a una escala menor que su escala operacional, ya que a las limitaciones de la visión humana han de sumarse las limitaciones de resolución que los dispositivos presentan. Por ejemplo, no tiene sentido representar el callejero de una ciudad a una escala pequeña como la que se utilizaría para representar un mapa mundial, ya que cada pequeño punto de la pantalla contendría un gran número de calles. Además de obtener un resultado inservible, se consumirían recursos en efectuar todos los cálculos necesarios para producir esa representación.

En ocasiones, el proceso de generalización es necesario por razones distintas a las anteriores, y requiere operaciones también distintas. Por ejemplo, podemos crear un mapa del mundo que contenga vías de comunicación, pero no todas, sino solo las principales autopistas de cada país. En este caso, no vamos a encontrar problemas con distintas carreteras que se solapan en la representación, ni tampoco un volumen excesivo de datos, pero debemos igualmente «adaptar» la representación a la escala, es decir, efectuar algún tipo de generalización. En este caso, se representarían las carreteras con un ancho mayor del real, ya que, de otro modo, no serían apenas visibles.

La generalización, por tanto, es un proceso que tiene como objetivo la producción de una imagen cartográfica **legible y expresiva**, reduciendo el contenido del mapa

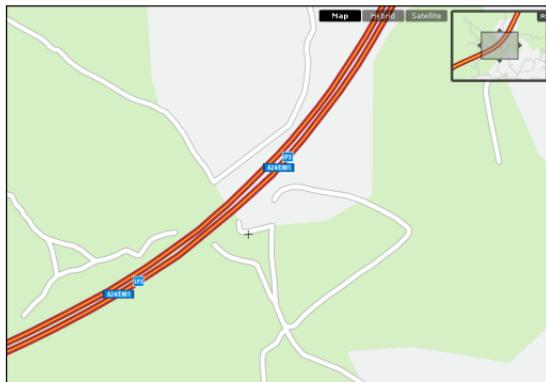


Figura 3.3: Un ejemplo de generalización por agregación. Dos carreteras prácticamente paralelas y unidas se representan como dos elementos en el mapa, pero en el localizador de la parte superior izquierda, a escala de menor detalle, se generalizan como una única (Tomado de Yahoo Maps).

a aquello que sea posible y necesario representar. Para ello, se enfatiza lo que resulta de importancia y se suprime lo que carece de ella.

Existen diversas operaciones que se emplean en el proceso de generalización. Algunas de las más relevantes son las **simplificación** (representar un elemento menos complejo), la **agregación** (representar varios elementos como uno solo —Figura 3.3—), la **exageración** (representar elementos con mayor tamaño del que les corresponde) y el **desplazamiento** (representar en una posición modificada, para garantizar la legibilidad).

En un SIG, la generalización puede incorporarse como parte de los propios mecanismos de representación, aplicándose las transformación correspondientes en tiempo real. A partir de un juego de datos, se elaboran las representaciones según la escala a la que se estén representando. Esta solución tiene el inconvenien-

te de producir resultados que no resultan óptimos, por ser la generalización un proceso complejo y difícil de automatizar, y, sobre todo, el de consumir gran cantidad de recursos. La generalización en este caso tiene un objetivo cartográfico, pero en lugar de hacer más fluido el trabajo con datos de gran volumen, lo hace más lento.

Una solución alternativa y más adecuada de incorporar la generalización dentro de un SIG suele basarse en un enfoque multi-escalares (Figura 3.4), en el cual se maneja información de una misma zona de estudio a diferentes escalas, y se usa en cada momento aquella que resulte más conveniente. Si se trabajara con cartografía en papel, sería equivalente a tener varios mapas de una zona a diferentes escalas.

El concepto de *capa*, que veremos en el capítulo 4 y que es vital para la idea actual de un SIG, permite este manejo simultáneo de información a distintas escalas.

En el caso de imágenes, este enfoque multi-escalares implica la creación de las denominadas **pirámides** (Figura 3.5).

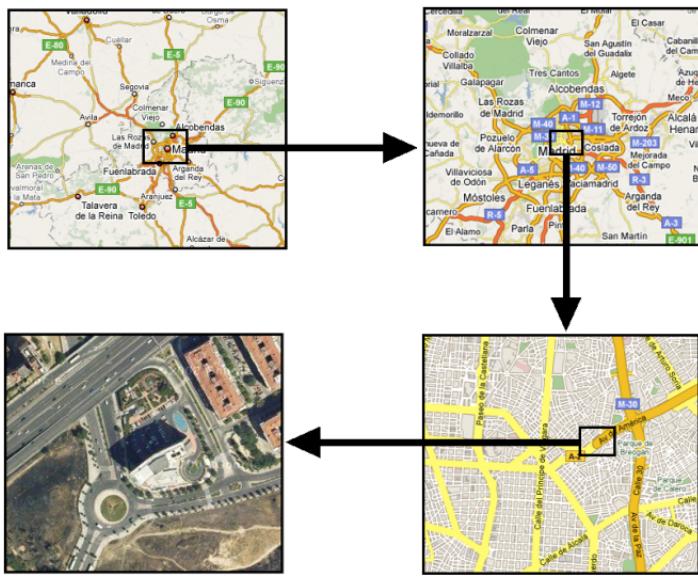


Figura 3.4: En un SIG es habitual manejar información a diferentes escalas. En función de la escala de representación, la información visualizada será una u otra.



Figura 3.5: Pirámides de representación con imágenes preparadas a distintas escalas (Fuente: OSGeo).

EL DATO GEOGRÁFICO Y SU ALMACENAMIENTO

De todos los subsistemas de un SIG, el correspondiente a los datos es el pilar fundamental que pone en marcha los restantes. Los datos son el combustible que alimenta el SIG. El subsistema de datos es, a su vez, el más interrelacionado, y está conectado de forma inseparable a todos los restantes.

DATOS *vs* INFORMACIÓN. TIPOS DE INFORMACIÓN.

Existe una importante diferencia entre los conceptos de **datos** e **información**. Un SIG es un Sistema de *Información Geográfica*, pero maneja *datos* geográficos, existiendo diferencias entre estos conceptos.

Entendemos como dato al simple conjunto de valores o elementos que utilizamos para representar algo. Por ejemplo, el código 502132N es un dato.

El dato anterior podemos interpretarlo como si fuera una referencia geográfica, y cuyo significado sería entonces una latitud, en particular $50^{\circ}21' 32''$ Norte. Si lo interpretamos como un código que hace referencia a un documento de identificación de una persona, la

información que nos aporta es en ese caso completamente distinta. El dato sería el mismo, formado por seis dígitos y una letra, pero la información que da es diferente, ya que lo entendemos e interpretamos de manera distinta.

La información es, por tanto, el resultado de un dato y una **interpretación**, y el trabajo con datos es en muchos casos un proceso enfocado a obtener de estos toda la información posible.

Comprender el significado y las diferencias entre datos e información permiten entender entre otras cosas que la relación entre los volúmenes de ambos no es necesariamente constante. Por ejemplo, los datos 502132NORTE o CINCUENTA VEINTIUNO TREINTAYDOS NORTE son mayores en volumen que 502132N, pero recogen la misma información espacial que este (suponiendo que los interpretamos como datos de latitud).

En la información geográfica se distinguen dos componentes: **espacial** y **temática**. La componente espacial hace referencia a la posición dentro de un sistema de referencia establecido, y responde a la pregunta *¿dónde?*. La componente temática responde a la pregunta *¿qué?*, y define la naturaleza del fenómeno que se produce en la localización indicada por la componente espacial.

Mientras que la componente espacial va a ser generalmente un valor numérico, pues son de esa naturaleza los sistemas de coordenadas que permiten expresar una posición concreta en referencia a un marco dado, la componente temática puede ser **numérica** o **alfanumérica** (texto). Una variable numérica puede a su vez ser de cuatro tipos: **nominal**, **ordinal**, **intervalo** o **razón**.

El tipo de variable condiciona las operaciones que pueden realizarse con un dato geográfico en función de cómo sea su componente temática.

Un concepto a tener en cuenta en relación con las componentes de la información geográfica es la **dimensión**. Los elementos que registramos pueden ir desde sencillos puntos (0D) hasta volúmenes tridimensionales (3D).

Las diferentes formas de representar y almacenar la información, que veremos más adelante en este capítulo, dependen del tipo de variable con que se trabaje.

DIVISIÓN DE LA INFORMACIÓN. CAPAS

En un SIG, la información espacial referida a una zona de estudio está dividida en varios niveles, de tal forma que, pese a coincidir sobre un mismo emplazamiento, información sobre distintas variables se encuentra recogida de forma independiente. Es decir, en función de la componente temática se establecen distintos bloques de datos espaciales. Cada uno de estos bloques temáticos se conoce como **capa** (Figura 4.1).

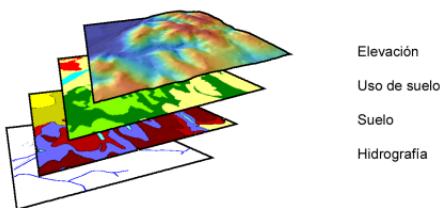


Figura 4.1: Concepto de *capa* de información geográfica dentro de un SIG

El concepto de capa es imprescindible para comprender todo SIG, y favorece la correcta estructuración

de la información y el trabajo con ella. Toda la información geográfica con que trabajemos en un SIG va a ser en forma de capas. Cada una de ellas puede abrirse de forma independiente en un SIG y utilizarse por sí misma o en conjunto con otras.

Con la cartografía clásica, no es posible (o resulta difícil e impreciso) combinar distintos tipos de información, como por ejemplo la contenida en un mapa topográfico y la existente en un mapa de tipos de suelo y otro de vegetación potencial. En el caso de un SIG, los distintos tipos de información se pueden combinar de forma sencilla y limpia, y no aparecen los mismos problemas

La relevancia del concepto de capa como elemento fundamental de un SIG es enorme, pues constituye el marco básico sobre el que se van a llevar a cabo gran parte de las operaciones. Por ejemplo, vimos en el apartado dedicado a la generalización cartográfica cómo en un SIG podemos utilizar diferentes «versiones» de los datos correspondientes a una zona concreta, y representar una u otra de ellas en función de la escala de trabajo. Estas versiones se almacenarán como distintas capas. La capa es así la unidad fundamental no solo en términos de un área dada, sino también de una escala concreta, y permite una división de los datos óptima a todos los efectos.

La separación de la información en capas evita asimismo la redundancia de datos, ya que cada capa contiene un tipo de información concreto. En un mapa clásico se presentan siempre varias variables, algunas de ellas presentes con carácter general, tales como nombres de ciudades principales o vías más importantes de comunicación. En un SIG, al encontrarse estas variables separadas en sus correspondientes capas, es el usuario

quien las combina.

El trabajo con capas permite, por tanto, una estructura **más organizada** y una **mayor atomización** de los datos, con las consecuentes ventajas en el almacenamiento, manejo y funcionalidad que esto conlleva.

Además de dividir la información geográfica en capas de acuerdo con su contenido, también dividimos esta con criterios puramente espaciales, «cortándola» en unidades menores que ocupen una región de amplitud más reducida. Este es un procedimiento similar al que encontramos en un mapa impreso, ya que el territorio de un país se encuentra cartografiado en diferentes *hojas*.

La principal cualidad de un SIG para integrar de forma transparente datos correspondientes a zonas distintas y formar un mosaico único es la **separación que existe entre datos y visualización**. Los datos son la base de la visualización, pero en un SIG estos elementos conforman partes del sistema bien diferenciadas. Esto quiere decir que los datos se emplean para crear un resultado visual pero en sí mismos no contienen valores relativos a esa visualización.

De este modo, es posible combinar los datos y después representarlos en su conjunto. Un proceso así no puede realizarse con un mapa ya impreso, pues este contiene ya elementos de visualización e incluso componentes cartográficos tales como una flecha indicando el Norte, una leyenda o una escala. Por ello, aunque puedan combinarse, realmente no se «funde» la información de cada uno de los mapas para conformar uno único. En un SIG, por el contrario, la visualización de cuatro o más bloques de datos puede ser idéntica a la que obtendría si todos esos datos constituyeran un único bloque.

MODELOS PARA LA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El proceso de convertir un área geográfica y la información acerca de ella en un dato susceptible de ser incorporado a un SIG puede dividirse en tres fases:

- Establecimiento de un **modelo geográfico**. Es decir, un modelo conceptual de la realidad geográfica y su comportamiento.
- Establecimiento de un **modelo de representación**. Es decir, una forma de recoger el anterior modelo conceptual y sus características propias, reduciéndolo a una serie finita de elementos.
- Establecimiento de un **modelo de almacenamiento**. Es decir, un esquema de cómo almacenar los distintos elementos del modelo de representación.

Por su mayor importancia, nos centraremos en los modelos de representación. Los modelos de representación que se utilizan principalmente en un SIG son dos: **modelo raster** y **modelo vectorial**. Las capas que utilizan estos modelos se conocen como **capas raster** y **capas vectoriales**, y esta es la terminología habitual en el ámbito de los SIG para referirse a la naturaleza de una determinada capa.

Modelo ráster

El modelo ráster se basa en una **división sistemática** del espacio. Todo el espacio queda cubierto y caracterizado como un conjunto de unidades elementales, cada una de ellas con un valor asociado.

Lo más habitual es una división en una malla de **celdas cuadradas** o rectangulares. Conociendo la orientación de la malla y las dimensiones de cada una de

las celdas, así como las coordenadas de al menos una de ellas, es posible conocer las coordenadas del resto en virtud de su **estructura regular**. Con esto, conocemos los valores de la variable en todos los puntos del espacio cubierto por la capa. El **tamaño de celda** es un parámetro relacionado con la escala de trabajo de la capa, ya que define la resolución de esta y está en función de la precisión con que se han tomado los datos correspondientes.

La figura 4.2 muestra un ejemplo de una malla ráster con valores de elevación.

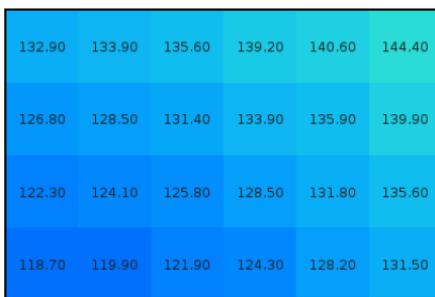


Figura 4.2: Celdas de una malla ráster con sus valores asociados.

El número de valores distintos recogidos para cada celda coincide con el número de las denominadas **bandas**. Una banda contiene un único valor en una capa raster. Puede entenderse una capa raster de más de una banda como un conjunto de capas (cada banda sería una subcapa de ese conjunto), teniendo en todas ellas la malla de celdas las mismas características espaciales, y presentándose el conjunto como un único elemento.

El ejemplo más claro de uso del modelo raster lo encontramos en las imágenes. Una imagen digital se compone de una malla de elementos (denominados **pí-**

xeles, cada uno de los cuales tiene un color asociado). El conjunto de estos píxeles forman la imagen completa. Lo más habitual es que las imágenes contengan 3 bandas, correspondientes a las intensidades de los colores rojo, verde y azul, las cuales al combinarse permiten obtener el color de cada píxel.

Otro uso habitual del modelo raster es en los denominados **Modelos Digitales de Elevaciones** (MDE), que recogen la topografía de un terreno. El modelo raster es el habitual de capa raster son las capas con modelos De forma general, los valores de una capa ráster, en cualquiera de sus bandas, son casi exclusivamente numéricos, no estando los SIG preparados para manejar otro tipo de valores en la componente temática de una capa ráster. De esta forma, una capa raster puede equipararse al concepto matemático de una **matriz**, con las ventajas que ello supone para aplicar sobre ella herramientas matemáticas a la hora de su análisis.

En el caso de los

Modelo vectorial

El otro modelo principal de representación es el modelo vectorial. En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante **entidades**, para cada una de las cuales dichas características son constantes. Las entidades se componen de **primitivas geométricas**, y estas pueden ser de tres tipos: **puntos, líneas y polígonos**.

Utilizando puntos, líneas o polígonos, puede modelizarse el espacio geográfico si se asocia a estas geometrías una serie de valores definitorios. Una entidad puede tener **varias primitivas**. Por ejemplo, en una capa

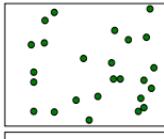
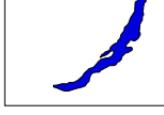
Primitiva	Entidad espacial	Representación	Atributos																					
Puntos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Altura</th> <th>Diámetro Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>17.5</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>45.6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> <td>27.2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>19.7</td> <td>36.1</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> </tr> </tbody> </table>	ID	Altura	Diámetro Normal	1	17.5	35	2	22	45.6	3	15	27.2	4	19.7	36.1
ID	Altura	Diámetro Normal																						
1	17.5	35																						
2	22	45.6																						
3	15	27.2																						
4	19.7	36.1																						
.	.	.																						
.	.	.																						
Líneas			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho máx(m)</th> <th>Cilindro máx(m)</th> <th>Longitud(km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>4.3</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>3.9</td> <td>5.2</td> </tr> </tbody> </table>	Ancho máx(m)	Cilindro máx(m)	Longitud(km)	15	4.3	35	6.3	3.9	5.2												
Ancho máx(m)	Cilindro máx(m)	Longitud(km)																						
15	4.3	35																						
6.3	3.9	5.2																						
Polígonos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie(km²)</th> <th>Profundidad máx(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31494</td> <td>1637</td> </tr> </tbody> </table>	Superficie(km ²)	Profundidad máx(m)	31494	1637																	
Superficie(km ²)	Profundidad máx(m)																							
31494	1637																							

Figura 4.3: Primitivas geométricas en el modelo de representación vectorial y ejemplos particulares de cada una de ellas con atributos asociados

de países, necesitaríamos varios conjuntos para representar España si queremos incluir tanto la península como las islas que la forman. Todos estos polígonos constituyen una única entidad, ya que todos pertenecen al mismo país y tendrán el mismo conjunto de valores asociados.

A la hora de definir las formas geométricas básicas, todas ellas pueden en última instancia **reducirse a puntos**. Así, las líneas son un conjunto de puntos interconectados en un determinado orden, y los polígonos son líneas cerradas, también expresables por tanto como una serie de puntos. Todo elemento del espacio geográfico queda definido, pues, por una serie de puntos que determinan sus propiedades espaciales y una serie de valores asociados.

Dentro de un SIG, una capa vectorial puede contener **un único tipo de primitiva**. Así, tenemos capas

vectoriales de puntos, de líneas y de polígonos, respectivamente. Una variable puede recogerse con varios tipos de primitivas (por ejemplo, puede indicarse una ciudad con un punto o con un polígono que delimita su perímetro), y la elección de uno u otro tipo de geometría ha de ser función del tipo de fenómeno que se pretende modelizar o la precisión necesaria, entre otros factores.

La componente temática en el modelo vectorial se establece mediante los denominados **atributos**, que suelen ser múltiples, a diferencia de lo que sucede en el modelo raster, donde lo habitual es tener un único valor para cada celda. Los atributos de una capa vectorial pueden contener información de cualquier clase, siendo más versátiles que en el caso de las capas ráster, donde ya vimos que se maneja únicamente información numérica. Por su estructura particular (series de atributos asociados a una entidad), la componente temática en el modelo vectorial se presta especialmente a representarse en tablas y almacenarse en una **base de datos**, y puede analizarse independientemente de la componente espacial.

Un elemento particular del modelo de representación vectorial es la **topología**. Una capa vectorial contiene topología si en ella se almacenan de algún modo las relaciones espaciales que existen entre sus elementos. Disponer de topología en una capa vectorial es de gran importancia a la hora de llevar a cabo ciertos tipos de análisis, así como procedimientos tales como la edición de los propios datos geográficos.

Aunque la mayoría de operaciones con una capa vectorial pueden llevarse a cabo en ausencia de topología, algunas de ellas como el **análisis de redes** no se pueden llevar a cabo sin topología. Si pensamos en una capa de vías sobre la que desarrollar ese análisis

de redes, un mero conjunto de elementos geométricos (líneas en este caso), no nos da información sobre los posibles enlaces entre las vías que quedan representadas. Los puntos donde se cruzan dos vías pueden ser cruces o rotondas (es decir, puede pasarse de una vía a otra, existiendo conexión entre ellas), o bien pasos elevados o subterráneos donde una de las vías pasa por encima de la otra (y por tanto no existe comunicación entre ambas). Las circunstancias son muy distintas en función del tipo de cruce que exista, y por ello es imprescindible conocer esta información para efectuar un análisis de redes correcto (Figura 4.4)

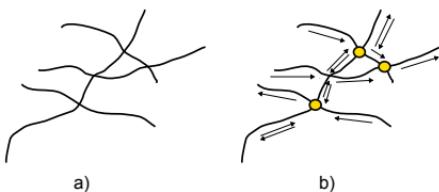


Figura 4.4: Capa de vías de comunicación sin topología (a) o con ella (b). Los puntos en este segundo caso indican conexiones entre vias, y son una representación visible de la topología existente.

El almacenamiento de entidades basado en una mera lista de coordenadas de cada entidad, sin topología, se conoce popularmente como *spaghetti*, pues si pensamos en una capa de lineas sin topología que se entrecruzan en el espacio, esta se asemejan en cierta forma a un caótico plato de *spaghetti* sin orden ni relación entre ellos.

Raster vs vectorial

Tanto el modelo raster como el vectorial pueden emplearse para recoger **cualquier tipo de información**.

La figura 4.5 muestra un ejemplo de esto, representando una capa de vías según ambos modelos. Otro ejemplo para mostrar esto lo encontraremos en las capas de elevaciones, que ya hemos visto que suelen recogerse en capas raster, en especial si se va a desarrollar sobre ellas algún tipo de análisis. No obstante, pueden recogerse también como una capa vectorial de puntos (este es un caso habitual si se obtienen los datos de un levantamiento topográfico), o bien como una capa de líneas que contenga **curvas de nivel**, entre otras opciones.

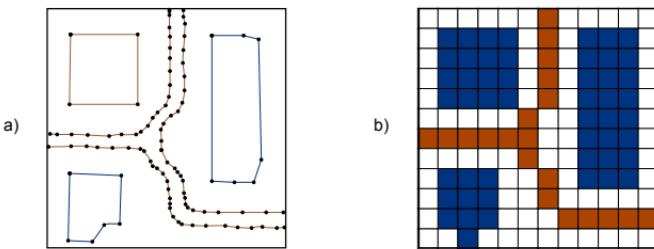


Figura 4.5: Comparación entre los esquemas del modelo de representación vectorial (a) y ráster (b).

Resulta obvio que las diferencias entre los modelos ráster y vectorial son muy notables, y que cada uno de ellos posee sus propias ventajas e inconvenientes. Algunos aspectos a los cuales puede atenderse para comparar uno y otro modelo son los siguientes:

- **Planteamiento.** El modelo ráster hace más énfasis en aquella característica del espacio que analizamos (*qué y cómo*), mientras que el modelo vectorial da prioridad a la localización de dicha característica (*dónde*)
- **Precisión.** El modelo ráster tiene su precisión limitada por el tamaño de celda. Las entidades menores

que dicho tamaño de celda no pueden recogerse, y la variación espacial que sucede dentro del espacio de la celda tampoco.

Asimismo, existe una imprecisión en las formas. El detalle con el que puede recogerse la forma de una entidad geográfica según el modelo vectorial es, en la práctica, ilimitado, mientras que, como puede verse en la imagen 4.6, el modelo ráster restringe las formas a ángulos rectos, ya que la unidad base es un cuadrado.

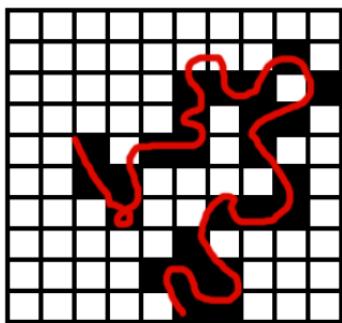


Figura 4.6: Imprecisión de forma en el modelo de representación ráster. La división del espacio en unidades cuadradas impide la representación fiel de entidades tales como curvas.

- **Complejidad.** La regularidad y sistematicidad de las mallas ráster hacen sencillo el implementar algoritmos de análisis, muy especialmente aquellos que implican el uso combinado de varias capas. Por el contrario, la irregularidad espacial de las capas vectoriales hace que la implementación de los mismos algoritmos sea sumamente más compleja si se trabaja con estas capas.

No existe un modelo de representación idóneo de

forma global, sino que esta idoneidad depende de muchos factores, como por ejemplo:

- **Tipo de variable o fenómeno a recoger.** Las variables **continuas** tales como la elevación es más adecuado en general recogerlas en capas raster, para así facilitar su análisis, mientras que las variables **discretas** es preferible almacenarlas como capas vectoriales.
- **Tipo de análisis o tarea a realizar sobre dicha variable.** El uso que demos a una capa temática condiciona en gran medida el modelo de datos idóneo. Por ejemplo, en el caso de una capa de elevaciones, su análisis se lleva mejor a cabo si esta información está recogida según el modelo ráster. Sin embargo, si el objetivo principal es la visualización de esa elevación en conjunto con otras variables, unas curvas de nivel pueden resultar más adecuadas, ya que, entre otras cosas, no interfieren tanto con otros elementos a la hora de diseñar un mapa con todas esas variables.
- **Contexto de trabajo.** Por ejemplo, si queremos trabajar con imágenes, esto nos condiciona al empleo de datos ráster, ya que resulta mucho más sencillo combinarlos con las imágenes, las cuales siempre se presentan como capas ráster.

Existen procedimientos para **convertir** entre los formatos ráster y vectorial, de forma que el disponer de datos en un modelo de representación particular no implica que debamos desarrollar nuestro trabajo sobre dichos datos directamente, sino que podemos efectuar previamente una conversión. Los capítulos ?? y ?? tratan estos temas en profundidad.

FUENTES PRINCIPALES DE DATOS ESPACIALES

No hace tanto tiempo, toda la información que se manejaba dentro de un SIG tenía su origen en un mapa en papel, el cual debía *prepararse* para adaptarse a la naturaleza propia del SIG. El dato geográfico se obtenía a partir de la **digitalización** de cartografía, es decir, convertir los datos geográficos en formato impreso en datos en formato digital que un SIG pudiera manejar.

Un SIG implica una aplicación informática, y esta se alimenta en última instancia exclusivamente de datos digitales. Los datos geográficos digitales tienen una serie de ventajas frente a los analógicos (además del mero hecho de que podemos incorporarlos a nuestro SIG), y suponen, como sucede en muchos otros campos, un salto cualitativo importante. Entre estas ventajas, que son a su vez comunes a otros ámbitos, destacan la sencillez de actualización, la facilidad de distribución (en especial con la aparición de Internet), el menor espacio físico necesario para su almacenamiento, la facilidad y precisión del análisis, y la facilidad de mantenimiento (el dato digital no se degrada, lo que se degrada es su soporte, pero es sencillo replicar el dato sin pérdida de

calidad)

Hoy en día las técnicas de adquisición de datos han evolucionado y permiten crear datos que pueden ser directamente integrados en un SIG. Distinguimos así **fuentes de datos primarias y secundarias**.

Las fuentes de datos primarias son aquellas cuyos datos podemos emplear en un SIG, ya que estos, en su forma original, ya son susceptibles de ser sometidos a las operaciones de manejo y análisis que incorporan los SIG. Por su parte, las fuentes de datos secundarias generan datos que no pueden emplearse en un SIG sin un proceso de adaptación previo, siendo el dato derivado el que utilizamos en un SIG, no el original.

En este capítulo, veremos las distintas fuentes de datos con las que podemos trabajar un en SIG.

TELEDETECCIÓN

La primera fuente de datos que trataremos en este capítulo es la teledetección. Entendemos por teledetección el estudio y medida de las características de una serie de objetos (en nuestro caso elementos de la superficie terrestre) sin que exista contacto físico. Para ello, se miden las perturbaciones que el objeto provoca en su entorno, principalmente las de tipo electromagnético.

Un sistema de teledetección cuenta con los siguientes elementos (Figura 5.1):

- **Una fuente de radiación (A).** Puede ser de origen natural o artificial. La radiación emitida por dicha fuente llega al terreno y sufre una perturbación causada por los elementos de este, siendo esta perturbación el objeto de estudio de la teledetección. Los propios objetos pueden ser también emisores ellos mismos de radiación.

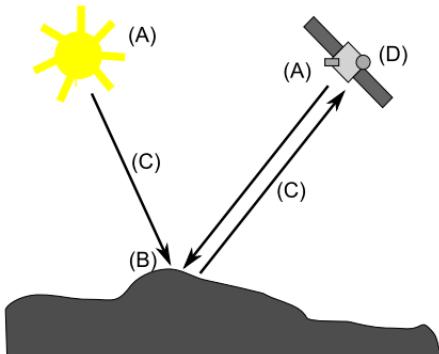


Figura 5.1: Esquema de un sistema de teledetección.

- **Unos objetos (B) que interactúan con la radiación** o la emiten, según lo anterior.
- **Una atmósfera (C)** por la que se desplaza la radiación, tanto desde la fuente hasta el objeto como desde el objeto hasta el receptor. La atmósfera también interactúa con la radiación, introduciendo igualmente perturbaciones en ella.
- **Un receptor (D) que recoge la radiación** una vez esta ha sido perturbada o emitida por los objetos. El receptor va a generar como producto final una imagen (en términos de un SIG, una capa ráster), en cuyas celdas o píxeles se va a contener un valor que indica la intensidad de la radiación. Estos valores son valores enteros que indican el nivel de dicha radiación dentro de una escala definida (habitualmente valores entre 1 y 256), y se conocen dentro del ámbito de la teledetección como **Niveles Digitales**.

A lo largo de este apartado veremos con detalle estos elementos. Para estudiar los dos primeros, estudiaremos los fundamentos físicos relativos a la radiación y a la interacción entre esta y la materia, mientras que

para el estudio del sistema receptor analizaremos los elementos de este en dos componentes por separado: sensores y plataformas.

La interacción de la atmósfera interesa de cara a eliminar su efecto, ya que lo que resulta de interés en general son los objetos en la superficie terrestre, no la atmósfera como tal. Eliminar esta influencia de la atmósfera es parte de los procesos posteriores que se realizan con la imagen, y que se detallan en los capítulos dedicados al análisis de imágenes en lugar de en este.

Fundamentos físicos

La radiación electromagnética es producto de las alteraciones en los campos eléctrico y magnético, las cuales generan ondas correspondientes a cada uno de los campos magnético y eléctrico. Estas ondas se desplazan a la velocidad de la luz, y se pueden describir con los parámetros habituales, tales como la longitud de onda o la frecuencia. El rango de longitudes de onda cubierta por la radiación electromagnética se conoce como **espectro electromagnético**.

El espectro se subdivide en regiones en función de su longitud de onda, tales como (de menor a mayor longitud de onda) los rayos γ , los rayos X, la región ultravioleta, la región visible, la región infrarroja, o las microondas

La radiación emitida por una fuente de radiación es alterada por la presencia de los distintos objetos, ya que estos **absorben**, **transmiten** o **reflejan** esta.

Estos tres fenómenos se dan en diferente proporción en función de las características del objeto y de la radiación. La parte que interesa a efectos de la teledetección

es aquella que se refleja en el objeto, ya que esta es la que posteriormente puede recogerse y emplearse para la generación de las imágenes.

Como ya se dijo en el capítulo 4, las imágenes como capas ráster presentan habitualmente la particularidad de tener varias bandas. En lugar de un único valor para cada celda, existen n valores, uno por cada banda. La imagen recoge la **intensidad de la radiación** dentro de una amplitud dada del espectro, y a su vez subdivide esta en distintas franjas. Los Niveles Digitales de cada banda corresponden a la intensidad dentro de una de esas franjas del espectro en particular.

Puesto que cada objeto refleja la radiación de diferentes longitudes de onda de modo distinto, esto puede considerarse como una propiedad del objeto. Se tiene así el concepto de **firma espectral**, que es la respuesta característica de un tipo de objeto dentro del espectro electromagnético.

Sensores y plataformas

En un sistema de teledetección, dos son los elementos tecnológicos principales que lo definen: el **sensor** y la **plataforma**.

El sensor es el elemento que incorpora la capacidad de «leer» la radiación electromagnética y registrar su intensidad dentro de la una zona concreta del espectro. Puede ir desde una simple cámara fotográfica hasta un sensor más especializado.

Los sensores se denominan **pasivos** aprovechan las fuentes de radiación existentes en la naturaleza (fundamentalmente el Sol) y se limitan a recoger la radiación de dichas fuentes reflejada por los elementos del medio, o **activos** sí emiten radiación, y recogen

dicha radiación tras ser reflejada por dichos elementos. Para entender este concepto de un modo de un modo sencillo, podemos decir que una cámara fotográfica es un sensor pasivo, mientras que una cámara fotográfica con *flash* es un sensor activo. La radiación emitida por los sensores activos no ha de ser necesariamente luz visible (como en el caso del *flash*), sino que pueden emitir en otras secciones del espectro.

Tecnologías como el **radar** o el **LiDAR** (similar al radar pero con pulsos de laser en lugar de ondas de radio), se basan en sensores activos. En el caso del LiDAR, permite obtener imágenes que no tiene un carácter visual, sino que contienen en sus valores la elevación de los objetos, pudiendo así emplearse para cartografiar el relieve.

La plataforma, por su parte, es el medio en el que se sitúa el sensor y desde el cual se realiza la observación. A bordo de una plataforma pueden montarse **varios sensores**.

Los dos tipos principales de plataformas son aquellas situadas **dentro de la atmósfera** terrestre (aviones en su mayoría) y aquellas situadas **fuerza de la atmósfera** (a bordo de satélites).

Los aviones tienen la ventaja de su **disponibilidad**, ya que pueden pilotarse y de este modo permiten cubrir cualquier lugar de la tierra en cualquier momento.

A diferencia de un avión, un satélite no puede dirigirse a voluntad (no puede pilotarse), y su movimiento es una característica inherente que viene definida por una serie de parámetros. Estos parámetros se conocen como **parámetros orbitales** pues definen la órbita descrita por el satélite en torno a la Tierra.

Las órbitas pueden clasificarse en función de su **eje de rotación** así como en función de su **movimientos**.

En este último caso tenemos órbitas **geosíncronas** (el satélite se sitúa sobre un punto fijo de la Tierra y su movimiento sigue al de rotación de esta) o **heliosíncronas** (mientras el satélite recorre la órbita, la Tierra efectúa su movimiento de rotación, lo cual hace que a cada vuelta de la órbita se cubran zonas distintas)

Resoluciones

Uno de los parámetros principales que definen las propiedades de un sistema de teledetección son las *resoluciones*. Estas establecen el nivel de detalle de los productos que el sistema genera, determinando este en las distintas magnitudes en las que el sistema opera. Las resoluciones dependen del sensor y de la plataforma como binomio operativo, y de las características propias de ambos. Distinguimos cuatro resoluciones, a saber:

- **Resolución espacial.** Indica la dimensión del objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen. Es la dimensión real que un píxel de la imagen tiene sobre el terreno.
- **Resolución espectral.** Indica la amplitud de cada una de las regiones del espectro que se recogen en la imagen. La región del espectro abarcada y el número de bandas son los elementos que definen la resolución espectral.
- **Resolución radiométrica.** Para cada una de las bandas que produce un sensor (asociada esta a una determinada región del espectro según su resolución espectral), el dato recogido, que constituye su Nivel Digital, indica la intensidad correspondiente a esa región. El nivel de detalle con el que puede medirse esa intensidad es el que define la resolución radiométrica del sensor.

- **Resolución temporal.** Indica el tiempo que tarda el sensor en volver a tomar una imagen de una misma zona. Tiene sentido en el caso de sensores orbitales. La resolución temporal depende de la altura a la que se encuentra la plataforma que monta el sensor, así como la resolución espacial.

No resulta posible (por razones técnicas y teóricas) disponer de un sensor en el cual todas las anteriores regiones sean altas. Algunos sensores priman determinadas resoluciones, mientras que otros favorecen otras distintas.

A la hora de utilizar imágenes de teledetección, debe considerarse qué tipo de resolución resulta de mayor interés (por ejemplo, para localizar elementos de pequeño tamaño son necesarias imágenes con alta resolución especial). En base a esto, se escogerá una u otra clase de imágenes, que será la que ofrezca los valores de resolución más adecuados en conjunto. La utilización simultánea de datos de varios sensores en un proyecto es una alternativa para compensar este hecho.

Fotogrametría

Relacionada con la teledetección, encontramos la **fotogrametría**. La fotogrametría es la técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías. En el campo del SIG, es de especial interés la **fotogrametría aérea**, cuya base de trabajo tradicional son las fotografías aéreas, y que sirve principalmente para la creación de cartografía de elevaciones a partir de un proceso de **restitución**.

En lugar de imágenes individuales, la fotogrametría emplea pares de imágenes, cada una de ellas tomada desde un punto distinto. Mediante estereoscopía, resulta posible recrear el efecto que ambas imágenes tendrían para la reconstrucción tridimensional de la escena, y «engañosar» al cerebro del observador para que este pueda observar la escena con **volumen y profundidad**. Esto permite posteriormente conocer las formas del terreno, y a partir de ello crear las capas correspondientes, con información de elevaciones.

Cuando se emplean imágenes de satélite, los pares se pueden obtener con aquellas plataformas y sensores que permiten **variar el ángulo de visión**, de modo que en la misma pasada del satélite se toman imágenes de una zona desde distintos puntos.

Según su enfoque, la fotogrametría puede ser **analógica, analítica o digital**, siendo esta última la que se basa en el trabajo con imágenes digitales dentro de un entorno computerizado, y la que mayor relación tiene con los SIG.

La fotogrametría requiere de una *estación fotogramétrica*, que en el caso digital incorpora muchos elementos propios de un SIG, así como otros específicos del trabajo fotogramétrico. Entre estos, caben destacar aquellos que permiten la generación de visualizaciones con sensación de profundidad, así como los periféricos específicos tales como ratones 3D o manivelas similares a las que presentan los restituidores analíticos, facilitando así la adaptación de los operarios a este tipo de estación.

CARTOGRAFÍA IMPRESA. DIGITALIZACIÓN

Existe gran cantidad de cartografía en formato no digital, tales como mapas impresos o fotografías aéreas antiguas en formato analógico.

La **digitalización** de esta cartografía, necesaria para su uso en un SIG, supone la creación de capas raster o vectoriales a partir de ella. En este último caso, implica la **disgregación** de la información que contiene, ya que en un mapa clásico se presentan distintas informaciones que en el uso común de un SIG se almacenan en capas independientes.

La digitalización implica tres etapas: el **registro o georeferenciación** (Establecimiento del marco geográfico —sistema de coordenadas, puntos de control, etc—, de forma que los elementos digitalizados posteriormente sean correctos), la digitalización de la componente espacial (creación de geometrías en el caso de capas vectoriales), y la digitalización de la componente temática (creación de valores de celda en el caso de capas raster o de atributos en el caso vectorial).

La digitalización puede ser **manual o automática**. En el primer caso, es un operario quien introduce los valores de los elementos digitalizados, mientras que en el segundo caso es un procedimiento automatizado el que se encarga de ello.

Para la creación de capas raster, lo habitual es la digitalización automática, a partir del **escaneo** del documento original.

El escaneo es el proceso de digitalización que convierte una imagen impresa (analógica) en una imagen digital. Dentro de un SIG, se emplea para digitalizar tanto mapas como fotografías aéreas, y su resultado es una capa ráster.

Aunque existen escáneres específicamente diseñados para el trabajo con documentos cartográficos, estos son dispositivos muy especializados y de muy elevado coste. Los escáneres más genéricos, pensados para el trabajo con todo tipo de imágenes y para todo tipo de usos, pueden no obstante emplearse de igual modo para escanear tanto mapas como imágenes aéreas con resultados aceptables, utilizándose con frecuencia.

Los parámetros básicos que definen las características de un escáner son la **resolución espacial** y la **resolución radiométrica**. La primera de estas se mide habitualmente en **puntos por pulgada** y nos indica el número de puntos (celdas) que el sensor es capaz de tomar por cada unidad de longitud sobre el papel. La resolución radiométrica, por su parte, indica la capacidad del sensor para distinguir entre dos colores distintos.

En relación con las resoluciones de escaneo, no deben olvidarse los fundamentos cartográficos que se explicaron en el capítulo 3. Trabajando con una resolución más elevada no hace necesariamente que estemos incorporando más información, ya que esta puede no existir en el documento original. Tendríamos un volumen de datos más elevado que el necesario para recoger toda la información del mapa.

En el caso de capas vectoriales, es más habitual la **digitalización manual**. En ella, un operario va definiendo las entidades, trazando las forma de estas o, en caso de ser una entidad de tipo punto, indicando su localización.

Para llevar a cabo ese trazado de la entidad, se necesita emplear algún equipo que recoja la información introducida por el operador. Existen dos alternativas principales: utilizar una **tableta digitalizadora** di-

señada específicamente para la digitalización, o bien digitalizar utilizando las **funciones de edición** de un SIG, realizando todo el proceso dentro de este y sin más herramientas que el propio ordenador y un dispositivo señalador como el ratón. En este segundo caso, la digitalización se produce sobre la pantalla, por lo que es necesario tener ya una versión digital del documento (aunque no en forma de capa vectorial), la cual puede obtenerse mediante escaneo.

La digitalización automática de entidades para formar una capa vectorial, conocida como **vectorización**, resulta también posible, aunque presenta más dificultades. El principal problema reside en la necesidad de una **adecuada preparación** del documento a digitalizar, ya que las condiciones de este afectan notablemente a la calidad del resultado. La vectorización, al igual que la digitalización manual, puede llevarse a cabo mediante dispositivos especializados, o bien mediante el software apropiado, el cual se ejecuta en un ordenador y trabaja con una imagen escaneada del documento original.

Un caso particular de digitalización es la creación de **capas a partir de valores o coordenadas**. Es decir, cuando no existe un mapa o documento cartográfico, sino simplemente una serie de datos espaciales expresados de forma alfanumérica que son susceptibles de convertirse en una capa y emplearse así dentro de un SIG. Este proceso se conoce como **geocodificación** e implica la asignación de coordenadas a puntos de interés tales como muestras de campo levantamientos topográficos, inventarios de lugares donde tiene lugar un determinado fenómeno o existe un determinado elemento, u otros como el *geotagging* de fotografías, para asociar a estas la posición del enclave en el que se han tomado.

En el caso de encontrarse en formato analógico, estos datos pueden digitalizarse mediante la simple introducción manual de coordenadas a través del teclado o bien mediante algún sistema más específico como el escaneo del documento y el empleo de algún software de reconocimiento de caracteres (OCR).

En el caso de encontrarse ya en formato digital, estos datos pueden presentarse como tablas en una hoja de cálculo, datos asociados a otro dato de cualquier tipo (como en el caso del *geotagging*) o incluso simples archivo de texto. Muchos SIG incorporan métodos para leer estos archivos y después utilizar las coordenadas que contienen con el fin de crear una nueva capa, en general de puntos.

Calidad de la digitalización

Uno de los aspectos más importantes del proceso de digitalización es la **calidad del resultado** obtenido, que debe tratar de ser lo más cercano posible a la calidad original de la información que se digitaliza, es decir, del mapa o imagen original. Independientemente de la precisión del equipo utilizado o la habilidad y experiencia del operario, la digitalización no es por completo perfecta, conteniendo siempre ciertas deficiencias y errores.

Además de los errores que puedan incorporarse en las distintas fases del proceso de digitalización (sea este del tipo que sea), hay que considerar que las fuentes originales a digitalizar también pueden incluir los suyos propios. Así, el proceso de escaneado puede incorporar distorsiones geométricas, pero es posible que el mapa o fotografía aérea de partida también presente algu-

na distorsión como consecuencia de su deterioro, más patente cuanto más antigua sea esta.

La información contenida en el documento cartográfico puede también contener elementos problemáticos de cara a obtener un producto de calidad, que pueden ir desde líneas borradas total o parcialmente a manchas en el propio mapa derivadas de su uso habitual.

Dentro de los errores que aparecen como consecuencia de la digitalización en sí, un tipo importante de ellos son las **discrepancias y coincidencias imperfectas** entre las distintas entidades, tal como las que se muestran en la figura 5.2

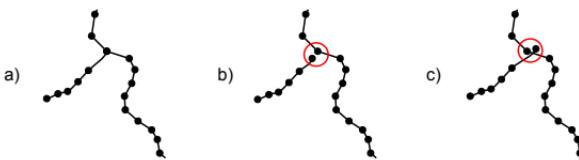


Figura 5.2: Errores derivados del proceso de digitalización. a) Versión correcta, con nodos coincidentes. b) y c) Versiones con errores que causan una falsa desconexión entre las líneas.

Debido a esto, las capacidades de edición de los SIG incorporan funcionalidades que permiten evitar estos errores en el momento de la digitalización, ayudando al operario en su tarea y permitiéndole alcanzar una exactitud y precisión imposible de lograr sin estas funcionalidades. Entre ellas, es especialmente importante el establecimiento de tolerancias y ajuste automático en función de ellas (esto se conoce con el término inglés **snapping**), que ayudan a garantizar la coincidencia entre los distintos vértices.

El hecho de que exista una completa coincidencia es especialmente importante cuando la capa vectorial que se digitaliza contiene **información topológica**.

La topología exige que la coincidencia sea correcta y defina perfectamente la relación entre las entidades. La digitalización de entidades, en caso de querer recoger su topología, debe realizarse siguiendo reglas adicionales tales como la digitalización una única vez de los lados comunes de polígonos. Debe, asimismo, recoger información adicional, como por ejemplo la necesaria para la definición de nodos en los cruces entre líneas cuando existe relación entre estas.

GPS

Uno de los hitos en la aparición de nuevas fuentes de datos geográficos es la aparición de los **Sistemas Globales de Navegación por Satélite**. Se trata de sistemas que permiten **conocer en todo momento y en cualquier punto del globo la localización exacta de dicho punto** con un margen de error del orden de unos pocos metros o menos. Para ello, se basan en el envío de señales entre un dispositivo situado en el punto concreto y una red de satélites, pudiendo establecerse la posición exacta mediante las características de dicha transmisión.

El ejemplo más extendido de estos sistemas es el **Sistema de Posicionamiento Global** (Global Positioning System, o **GPS**). El GPS cuenta con una constelación de 24 satélites activos, así como estaciones terrestres que los controlan, y su funcionamiento se basa en la **triangulación de la posición** de una unidad receptora, mediante las señales procedentes de un cierto número de satélites. Esta triangulación se basa en distancias entre la unidad receptora y dichos satélites, las cuales se calculan mediante diversos mecanismos. La posición se calcula no únicamente en sus

coordenadas x e y , sino también en z , es decir en elevación. El sistema GPS emplea como sistema geodésico de referencia el WGS84.

El diseño de la red de satélites está pensado para garantizar que en cualquier punto de la superficie terrestre y en cualquier momento, un receptor puede localizar el número necesario de satélites para obtener con exactitud su precisión.

Existen **numerosas fuentes de error** que causa desviaciones apreciables en el cálculo de coordenadas mediante GPS. Entre ellas destacan los errores en la posición de los satélites, errores por el rebote de la señal en otros con anterioridad a alcanzar el receptor, errores por el paso de la señal por la atmósfera, así como los de precisión de los relojes empleados para el cálculo de distancias. La **disponibilidad selectiva** era un error aleatorio introducido en la señal GPS con fines militares, pero fue eliminada en el año 2000.

Entre las técnicas empleadas para corregir estas desviaciones, destaca el denominado **GPS diferencial**, pensado en origen para eliminar el error de la disponibilidad selectiva, aunque también eficaz para corregir una buena parte los restantes errores citados anteriormente.

Para la aplicación del GPS diferencial se requiere no solo un receptor único (aquel del cual se quiere calcular su posición), sino también otro **receptor fijo** de referencia cuyas coordenadas se conocen con alta precisión. Este receptor fijo es, a su vez, un receptor de alta precisión y, además de calcular su propia posición, emite información que las unidades receptoras pueden aprovechar para corregir sus mediciones. El receptor móvil, lógicamente, tiene que estar capacitado para

este tipo de correcciones, para así poder hacer uso de la señal de la estación de referencia.

El fundamento de esta técnica es que los errores que afectan al receptor móvil **también afectan al de referencia**. No obstante, la magnitud del error que afecta al receptor de referencia puede conocerse, ya que se conoce la coordenada exacta de este, y en base a eso puede eliminarse el error que afecta al receptor móvil, asumiendo que ambos errores son de similar índole.

En la actualidad, aplicando estas técnicas de corrección diferencial, un GPS puede obtener precisiones del orden de 2 metros en latitud y longitud, y 3 en altitud[?]. Sin corrección diferencial, esta precisión es de unos 10–20 metros.

La precisión del sistema GPS depende del tipo de receptor GPS (o, en el lenguaje común, GPS a secas) que se emplee, obteniéndose mayores precisiones con receptores más avanzados, siempre dentro de las posibilidades del propio sistema GPS. Existen muchas clases de receptores GPS, siendo dos de ellas las principales en relación con los SIG:

- **GPS para uso general.** Unidades **pequeñas y portátiles**, de bajo coste, para actividades al aire libre, donde no se requiere una precisión elevada sino simplemente un conocimiento de la posición aproximada. Se emplean, por ejemplo, para recoger rutas en senderismo o navegación.
- GPS para la medición topográfica. Unidades de medio tamaño, generalmente con una antena independiente que se conecta a la unidad y que el propio operario carga a la espalda. La antena garantiza **mayor precisión** y una mejor localización de satélites en condiciones tales como zonas bajo arbolado. Están pensados para un uso profesional en levantamientos

o replanteos, ofreciendo buena precisión en todas las coordenadas.

La capacidad principal de una unidad GPS en relación con un SIG es la de **recoger coordenadas**. Esta funcionalidad permite almacenar puntos o trazados completos, encontrándose el operario inmóvil o bien en movimiento a lo largo de dicho trazado. Es habitual utilizar los vocablos ingleses de la terminología GPS para denotar los distintos elementos que pueden recogerse, conociéndose a un punto de interés aislado como **waypoint** y un trazado como **track**. Una serie ordenada de *waypoints* se conoce como **route** (ruta).

En el trabajo con el receptor GPS, el operario se puede detener en un punto cualquiera y memorizar las coordenadas del mismo, añadiendo así un *waypoint* a la lista de los ya almacenados. Para crear un trazado, se suele disponer de funcionalidades de recogida automática de puntos, de tal modo que el receptor memoriza estos a intervalos fijos de tiempo. El operario simplemente ha de desplazarse por el trazado y dejar que el receptor haga su trabajo mientras tanto.

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA VOLUNTARIA

Hemos mencionado ya que los dispositivos tales como receptores GPS de bajo coste pueden emplearse para recoger información geográfica y crear datos geográficos, y que cuando esto se une a los conceptos participativos de la denominada **Web 2.0**, surgen iniciativas de gran interés en las que el usuario de a pie, sin necesidad de una formación específica como cartógrafo, puede aportar sus datos para que otros los exploten posteriormente. Aunque no se trata de una fuente de datos como tal, y los elementos y dispositivos

empleados ya los hemos visto a lo largo de este capítulo, el cambio que supone la inclusión de una filosofía acorde con las ideas de la Web 2.0 es tan notable que merece ser tratado por separado. No se trata de un cambio en la propia toma o preparación de datos, o de una tecnología nueva que se aplique a estos, sino de un **cambio social y filosófico** que redefine el propio concepto de la información geográfica en lo que a la creación del dato geográfico respecta, y cuyas consecuencias son ciertamente importantes, ya que abren el ámbito de la creación cartográfica a un nuevo y amplio grupo de personas.

Se conoce como *Información Geográfica Voluntaria o Participativa* (en inglés Volunteered Geographical Information, VGI) al uso de Internet para crear, gestionar y difundir información geográfica aportada voluntariamente por usuarios de la propia red. El conjunto de herramientas y técnicas que emplean esos usuarios para aportar su información conforma lo que se ha dado en llamar **neogeografía**. La comparación entre proyectos de creación de VGI y la bien conocida Wikipedia sirve perfectamente para ilustrar qué es lo que entendemos por VGI y neogeografía, ya que la VGI es el resultado de aplicar los conceptos de la Web 2.0 al ámbito de la información geográfica.

En el caso particular de esta última, la neogeografía ha supuesto un profundo cambio en algunas de las ideas básicas de la cartografía, modificando asimismo la concepción tradicional de la información geográfica, sus características o el papel que esta venía desempeñando en muchos ámbitos (o incluso dándole un papel en campos donde con anterioridad el uso de información geográfica era escaso). Algunas de las ideas principales sobre la neogeografía son las siguientes:

- **Popularización y democratización.** La producción cartográfica ha estado siempre en manos de gobiernos u organismos, y en muchas ocasiones fuertemente censurada debido a su elevado valor estratégico. Con la VGI, la creación de información geográfica se democratiza y se convierte en un proceso participativo libre y sin restricciones. Se invierte el esquema «hacia abajo» de producción y uso de información geográfica.
- Los ciudadanos se convierten en **sensores** y tienen mayor conciencia de su realidad geo-espacial.
- Se elimina parte del «misticismo» de la producción de información geográfica

la neogeografía es en la actualidad un fenómeno que no debe dejarse de lado, ya que los proyectos que aglutina se están convirtiendo paulatinamente en proveedores fundamentales de datos cuya calidad en muchos casos es excelente.

El proyecto de VGI de mayor relevancia es **OpenStreetMap** (OSM), un «proyecto colaborativo para crear mapas libres y editables».

METADATOS

Con independencia de la forma en que se hayan obtenido, los datos pueden requerir otros datos adicionales para interpretarse. Por ejemplo, si tenemos las coordenadas de un punto, para interpretarlo correctamente necesitamos conocer, entre otras cosas, el sistema de coordenadas en que vienen expresadas esas coordenadas. El dato con el que trabajamos (las coordenadas), requiere unos datos adicionales (por ejemplo, el código EPSG del sistema de referencia empleado) para cobrar verdadero sentido.

Surge así el concepto de **metadatos**. Los metadatos son **datos acerca de los datos**, y su misión es **explicar** el significado de los datos. Es decir, ayudan a los usuarios de los datos a entender mejor el significado que estos tienen y la información que guardan. Los metadatos son un documento adicional que acompaña a los datos, y que permite una mejor gestión y una utilización más precisa de ellos.

Trabajando en el entorno de un SIG, los metadatos pueden **referirse a ambas componentes** (temática y espacial)

El concepto de metadato no es algo nuevo y exclusivo de los datos digitales, ya que un mapa impreso también contiene metadatos en cierta forma. Una leyenda o un texto en un margen del mapa con información sobre la fecha en que se ha creado son también metadatos. En el caso de los datos geográficos digitales, los metadatos no forman parte del dato directamente sino que son independientes de este. Ello permitirá **realizar operaciones separadamente** con los metadatos, tales como búsquedas, que abren nuevas posibilidades y dan un gran valor a estos.

Dos de las funciones principales de los metadatos son garantizar el uso correcto y adecuado de los datos y facilitar su gestión, localización y consulta.

Los datos espaciales, como muchos otros datos, son creados habitualmente para un determinado objetivo, y este objetivo no ha de ser necesariamente evidente o contenerse como tal en los datos mismos. Cuando se emplean esos datos para un objetivo distinto a aquel para el que fueron diseñados, pueden surgir problemas debido a que se está realizando un proceso para el que los datos con los que se trabaja presentan carencias. Por ejemplo, consultar los metadatos puede **evitar**

el trabajo con datos desfasados o de precisión insuficiente, ya que conociendo estos parámetros es posible juzgar si los datos son adecuados al fin que se persigue con ellos.

Los creadores de datos deben procurar acompañar estos de metadatos precisos y suficientes, y los usuarios deben consultar estos antes de utilizar dichos datos. De este modo, se puede garantizar que un dato no es empleado de forma errónea y que los resultados que se obtendrán tendrán validez.

Los metadatos son un elemento muy importante en relación con la **calidad de los datos espaciales**.

Respecto a la gestión de los datos, los metadatos facilitan la organización y la realización de tareas tales como la búsqueda de datos dentro de una colección de estos. Los metadatos constituyen un «resumen» de las características principales de los datos, y pueden ser empleados para labores de búsqueda y localización de datos de un tipo dado. Los metadatos **facilitan y agilizan la localización** de los datos cuando estos se buscan **por criterios geográficos**. Añadiendo a los metadatos elementos como la extensión del área cubierta por los datos, este tipo de búsquedas se efectúan de forma más ágil y efectiva. En este sentido, el uso de metadatos es fundamental para el establecimiento de **catalogos** de datos, los cuales ya que responden a las peticiones del usuario del catálogo en función de la información que los metadatos contienen.

Contenido y creación de metadatos

La información que contienen los metadatos para una capa de datos espaciales depende de factores tales como el **modelo de representación** empleado,

el **formato** en que se almacenan los datos (formato de archivo, base de datos, etc.), la **organización, entidad o individuo responsable** o el **elemento al que se asocian** (conjunto de capas, capa individual, entidad...).

En el apartado ?? veremos las formas estandarizadas que existen para los metadatos geográficos, las cuales define directamente su contenido.

Algunos de los elementos comunes que se incorporan a los metadatos geográficos son la información **de identificación** (para identificarlo de forma única y distinguirlo de otros), la información **sobre la calidad de los datos** (incluyendo su origen y el de los datos de los que deriva, apareciendo así el concepto de **linaje** de los datos), la información **sobre la componente no espacial** o la información **sobre la distribución** (acceso, licencias, etc.)

Los metadatos puede **crearse en el origen** mismo de los datos, recogiendo la información al mismo tiempo que se producen los datos en sí. También pueden **extenderse posteriormente** por parte de distribuidores, organizadores o usuarios.

La creación de los metadatos se realiza en su mayor parte **de forma manual**, existiendo aplicaciones específicas para ello. Los metadatos que pueden extraerse de las capas de datos directamente, tales como la extensión cubierta por estos, pueden crearse de forma automática.

Los metadatos se almacenan en general como **ficheros adicionales** a los ficheros de datos, o bien como **parte de una base de datos**.

SOFTWARE Y TECNOLOGÍA

El concepto clásico de un SIG es el de una aplicación completa en la cual se implementan herramientas para llevar a cabo las tareas básicas del trabajo con datos geográficos: creación o edición, manejo y análisis. Junto a este enfoque tradicional, con el tiempo han surgido otras formas distintas de aplicaciones que también pueden considerar como parte del ámbito del SIG.

Veremos en este capítulo las características de las aplicaciones SIG, divididas en tres grupos fundamentales: herramientas de escritorio, cartografía en la Web (*Web-mapping*) y SIG móvil. Asimismo, veremos algunos aspectos tecnológicos relacionados con ellas.

HERRAMIENTAS DE ESCRITORIO

Podemos dividir las funciones básicas de un SIG de escritorio en cinco bloques: **entrada y salida de datos, visualización, edición, análisis y generación de cartografía**. Una aplicación de escritorio habitual presenta todas estas capacidades en cierta medida, aunque no necesariamente con el mismo nivel de implementación.

Entrada y salida de datos

Una aplicación SIG de escritorio debe implementar capacidades para **leer datos** y, opcionalmente, para **guardarlos**. Esta ultima es necesaria en el caso en que el SIG pueda generar nuevos datos geográficos (nuevas capas), pero no en aquellas aplicaciones sin capacidades de análisis o edición, donde su empleo no ha de crear nuevos datos.

La existencia de librerías y componentes de acceso a datos en los que las aplicaciones SIG de escritorio pueden apoyarse permite dar soporte al **gran número de formatos de datos existentes**, mejorando la **conectividad** entre estas.

Además de acceder a ficheros de datos, en la actualidad es importante poder acceder a **bases de datos** o **servicios remotos**. Hablaremos de estos últimos más adelante dentro de este capítulo.

Visualización

La visualización es una función fundamental dentro de los SIG y del trabajo con cartografía en general. Tiene importancia cuando la representación de los datos es el propósito principal de utilizar un SIG, pero también cuando el trabajo está enfocado a la edición o la realización de análisis, ya que la visualización y exploración visual de los datos de partida es un paso previo.

Esta estructura se compone fundamentalmente de un **lienzo** sobre el que se sitúan las distintas capas de información geográfica, y que el usuario va conformando añadiendo nuevas capas y editando su **simbología**, es decir, la forma en la que estas se representan. Las capas se sitúan en un **orden dado** dentro del lienzo, lo

que permite establecer una **jerarquía de representación** y así lograr el aspecto deseado.

Junto a este lienzo existen herramientas de navegación que permiten ampliar o reducir la escala, o bien modificar el encuadre (Figura 6.1).

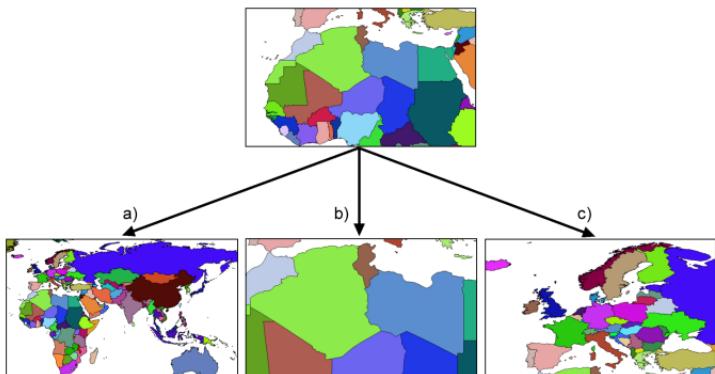


Figura 6.1: Herramientas de navegación fundamentales en el entorno gráfico de un SIG de escritorio. a) alejamiento (*zoom out*), b) acercamiento (*zoom in*), c) desplazamiento (*pan*)

El aspecto más destacable de la visualización de datos espaciales en un SIG es que, a diferencia de un mapa clásico donde no pueden modificarse sus características, el usuario puede aquí de forma rápida y sencilla elegir *qué* ve y *cómo* lo ve. El dato espacial digital es **independiente de la información necesaria para su representación** (colores, texturas, etc.), y un mismo dato puede por tanto representarse de maneras diferentes. Esto es particularmente cierto para el caso de capas vectoriales, así como para capas ráster que contengan un valor de tipo no gráfico, es decir, aquellas que no sean imágenes.

Aunque en el caso más habitual, la representación

de una capa en un lienzo de un SIG es bidimensional, de la misma forma que se representa en un mapa impreso, existen también SIG con capacidades de visualización tridimensional. En este caso, las herramientas de navegación son más complejas, existiendo ajustes relativos a la perspectiva, a los ángulos de visión o a la exageración del relieve, entre otros parámetros.

Análisis

El análisis es una capacidad fundamental de los SIG desde sus orígenes. Otros usos, tales como la visualización, pese a ser prácticamente imprescindibles hoy en día, estaban muy limitados en los primeros SIG.

La tendencia actual en los SIG es considerar las capacidades de análisis como herramientas modulares que se ejecutan sobre una plataforma base, la cual comprende las capacidades de visualización y entrada y salida de datos. Todas estas capacidades de análisis son independientes entre sí, aunque pueden coordinarse y emplearse en conjunto para alcanzar un resultado concreto.

Cuando las herramientas de análisis utilizan directamente la base del SIG donde se encuentran las capacidades de visualización y manejo de datos, puede existir cierto grado de interactividad. Por ejemplo, el usuario puede delimitar un área o introducir una corrdenaada operando sobr eel lienzo donde se representan las capas, y este valor se utilizará después como parámetro de entrada para una operación analítica.

En caso de no existir este tipo de interacción entre elementos de análisis y elementos de visualización y exploración de datos, los procesos de análisis suelen constituir utilidades autocontenidoas que simplemente

toman una serie de datos de entrada, realizan un proceso en el que el usuario no interviene, y finalmente generan un resultado con carácter definitivo. Este resultado podrá ser posteriormente visualizado o utilizado como entrada para un nuevo análisis.

Por su naturaleza, tanto los datos espaciales como los procesos en los que estos intervienen se prestan a formar parte de estos flujos de trabajo más o menos complejos, y es por ello que en los SIG actuales una funcionalidad básica es la creación de tareas complejas que permiten simplificar todo un proceso de muchas etapas en una única que las engloba a todas. La forma anteriormente comentada en que aparecen las formulaciones dentro de un SIG, de forma atomizada y modular, facilita la creación de estos «modelos» a partir de procesos simples.

Asimismo, las herramientas SIG que contienen funcionalidad de análisis suelen permitir el acceso a estas a través de lenguajes de *scripting*, lo cual facilita la creación de flujos de trabajo y la automatización de rutinas complejas de análisis. Si bien este trabajo no se realiza de un modo gráfico e intuitivo como en el ejemplo mostrado anteriormente, y requiere mayores conocimientos, la flexibilidad y potencia que ofrece es mucho mayor.

Edición

Los datos geográficos con los que trabajamos en un SIG no son una realidad estática. La información contenida en una capa es susceptible de ser **modificada o corregida**, y las funciones que permiten estas tareas son importantes para dotar al SIG de versatilidad. Sin ellas, los datos espaciales pierden gran parte de su

utilidad dentro de un SIG, ya que se limitan las posibilidades de trabajo sobre estos. Las funcionalidades de edición son, por tanto, básicas en una herramienta de escritorio.

Las operaciones de edición pueden emplearse para la **creación de nueva cartografía** (como vimos en el capítulo 5), así como para la **actualización** de esta.

Aunque las tareas de edición más habituales son las relacionadas con la edición de geometrías, no es esta la única edición que puede realizarse dentro de un SIG. Podemos distinguir las siguientes formas de edición:

- Edición de geometrías de una capa vectorial.
- Edición de atributos de una capa vectorial, incluyendo la adición o eliminación de atributos en toda una capa.
- Edición de valores de una capa ráster.

Las herramientas destinadas a la edición de entidades geométricas heredan sus características de los programas de **diseño asistido por ordenador (CAD)**, cuya funcionalidad principal es precisamente la edición de elementos gráficos. Aparecen en algunos casos herramientas adicionales, como sucede en el caso de que se registre **información topológica**.

Generación de cartografía

La mayoría de las herramientas de escritorio incorporan capacidades de creación de cartografía impresa, generando un documento cartográfico que posteriormente puede imprimirse y emplearse como un mapa clásico. Estas capacidades permiten la composición de documentos cartográficos de acuerdo con un diseño dado, y la impresión directa de estas en algún periférico

tal como una impresora común o un *plotter* de gran formato.

Las funciones de diseño que se implementan por regla general en un SIG son similares a las que pueden encontrarse en un software de maquetación genérico, permitiendo la **composición gráfica del documento** general y el **ajuste de los distintos elementos** que lo forman. Entre estos elementos, destaca el mapa como tal, es decir, aquel que contiene la representación del dato geográfico.

Junto a esto, las herramientas de escritorio incluyen funcionalidades para **automatizar la producción cartográfica**, tales como la creación de plantillas o las generación de series de mapas que cubren en su conjunto una amplia extensión, fragmentando esta en unidades (Figura 6.2)

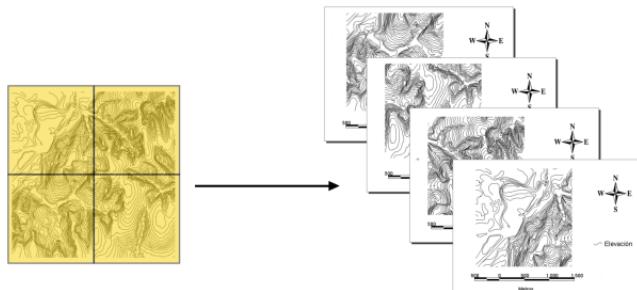


Figura 6.2: La automatización de las tareas de creación cartográfica permite simplificar la producción de grandes volúmenes de cartografía, como por ejemplo al dividir un área geográfica en una serie dada de mapas.

Estas posibilidades surgen de la **separación entre los datos espaciales y el diseño del documento cartográfico** que los contiene, del mismo modo

que ya vimos que existe entre datos y parámetros de representación a la hora de visualizar los primeros.

CARTOGRAFÍA EN LA WEB (*Web-mapping*). CLIENTES Y SERVIDORES

Uno de los avances más importantes en la historia de los SIG lo constituye la llegada del *Web Mapping*. Entendemos como tal a las tecnologías que permiten **incorporar las ideas de los SIG dentro de páginas Web**, utilizando un navegador Web como aplicación principal. Asimismo, estas tecnologías, junto a la importancia de Internet, han propiciado el desarrollo de otros elementos tecnológicos tales como **servicios de datos remotos**, que se utilizan tanto en las aplicaciones de escritorio como en el propio *Web Mapping*.

Los conceptos de **servidor** y **cliente** son fundamentales en este contexto. Veamos algunas ideas generales al respecto.

Conocemos como *servidor* al elemento encargado de *servir* algún tipo de contenido. En el ámbito SIG, se trata fundamentalmente de datos geográficos, que constituyen el principal producto que se distribuye a través de la red dentro de nuestro campo.

El *cliente* es responsable de *pedir* ese dato al servidor, tomarlo y trabajar con él. Un navegador Web es un cliente, ya que realiza una petición para mostrar una página Web. Al introducir una dirección Web en la barra de direcciones del navegador, proporcionamos una serie de datos que son los que se emplean para realizar el proceso, y que vamos a ver a continuación en detalle.

Supongamos la dirección Web:

<http://victorolaya.com/writing>

Al visitar esa página, se efectua una petición a través de su dirección, la cual se compone de las siguientes partes:

- **http**: El protocolo a usar, que define la forma en que se van a comunicar cliente y servidor.
- **victorolaya.com**: Esta cadena identifica la máquina donde reside la página que buscamos. Es en realidad una versión más legible para el ojo humano de un código numérico que indica la dirección concreta.
- **writing**: La página que buscamos dentro de todas las que hay en esa máquina.

El proceso mediante el que podemos ver esa página en un navegador Web comprende los cuatro pasos siguientes:

1. El cliente realiza la petición.
2. La petición se conduce a través de la red hasta el servidor.
3. El servidor busca la página y la devuelve a través de la red en caso de encontrarla, o devuelve una página de error en caso de no tenerla.
4. El cliente recibe la página y la representa.

La figura 6.3 muestra un esquema de este proceso.

De modo gráfico, la relación entre ambos elementos puede representarse según la figura 6.4. En ella, un número variable de clientes se «conectan» a un servidor, del cual obtienen una serie de datos cuando este responde a las peticiones formuladas por cada uno de los clientes. En la arquitectura cliente-servidor, este último es el que posee la información a compartir a

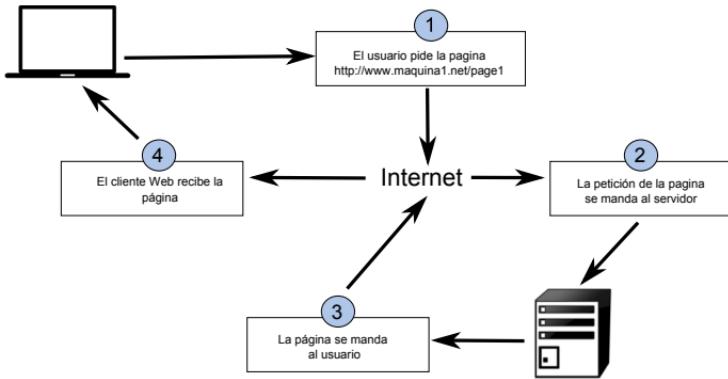


Figura 6.3: Esquema del proceso de consulta de una página Web desde un navegador.

través de los servicios, mientras que en cada uno de los clientes se almacena tan solo la información personal de estos.

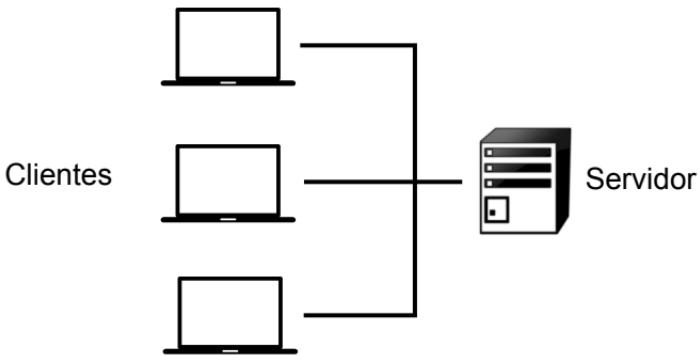


Figura 6.4: Relación entre clientes y servidores.

Veamos ahora algunas características de los servidores y clientes dentro del ámbito SIG.

Respecto a los servidores, las capacidades funda-

mentales en este contexto pueden dividirse en los siguientes grupos:

- **Servir representaciones de los datos.** El servidor puede responder directamente a este tipo de necesidades, preparando una **imagen a partir de los datos geográficos** de los que dispone. En el caso de que estos sean ya imágenes —por ejemplo, imágenes de satélite u ortofotos—, bastará servir estas, transmitiendo una versión escalada de las dimensiones exactas que el cliente necesite para representar en pantalla. En caso de que los datos sean de tipo vectorial, o bien ráster sin una forma de representación implícita —por ejemplo, un Modelo Digital del Terreno— es necesario emplear algún método para asignarles dicha representación. Este puede ser asignado por defecto por el servidor, que establecerá una simbología fija, o bien ofrecer un servicio más complejo en el que el cliente no solo pide una representación gráfica de una serie de datos para una zona dada, sino que además puede especificar *cómo* crear esa representación.
- **Servir los datos directamente.** Una opción más flexible que lo anterior es que el servidor provea **directamente los datos geográficos** y sea después el cliente quien los utilice como corresponda, bien sea simplemente **representándolos**, o bien trabajando con ellos de cualquier otra forma, como por ejemplo **analizándolos**.
- **Servir consultas.** Un paso más allá en la funcionalidad que puede ofrecer el servidor es responder a *preguntas* realizadas por el cliente relativas a los datos, ya sean estas relativas a la parte espacial de dichos datos, o bien a su componente temática. El servidor puede ofrecer como respuesta **conjuntos**

reducidos de los datos de los que dispone, o **valores que describan** a estos. Estas consultas pueden ser útiles, por ejemplo, para **establecer filtros** previos cuando se dispone de un conjunto amplio de orígenes de datos. Un cliente Web puede obtener datos de distintos servidores, y puede consultar si, para un zona dada, estos servidores disponen de información, sin más que consultar la extensión cubierta por los datos de cada uno de ellos y comprobar si se interseca con la región de interés. En función de la respuesta, puede o no realizarse posteriormente el acceso a los datos en sí. Como ya vimos en la sección 5, los **metadatos** son de gran utilidad para conseguir que este tipo de consultas se realicen de forma eficiente.

- **Servir procesos.** Por último, un servidor puede ofrecer nuevos datos, espaciales o no espaciales, resultantes de algún tipo de proceso o cálculo a partir de datos espaciales. En este caso, el proceso constituye en sí el servicio ofrecido por el servidor, y el cliente debe definir los parámetros de entrada de este y los posibles parámetros de ajuste que resulten necesarios. Los datos con los que se trabaja pueden ser proporcionados por el cliente, incorporándolos a su propia petición, o bien pueden residir en el propio servidor. También pueden emplearse datos en un servidor distinto, a los que el servidor de procesos puede acceder si estos están disponibles, convirtiéndose en cliente de ese segundo servidor (Figura 6.5).

Respecto a los clientes, distinguimos en función de sus capacidades dos clases:

- **Cliente pesado.** El cliente *pesado* es una **aplicación individual** que no se ejecuta sobre otra aplicación soporte como puede ser un navegador Web.

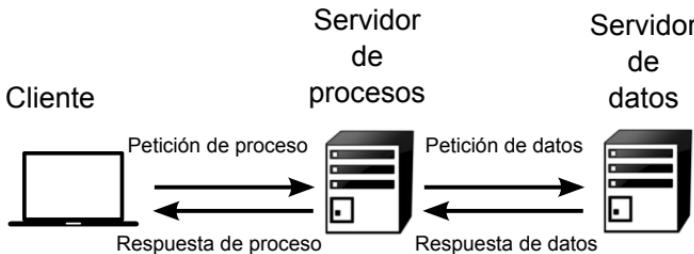


Figura 6.5: Esquema de acceso a un servicio de procesos remotos, el cual a su vez utiliza datos de un segundo servidor. El encadenamiento de procesos permite ampliar notablemente la utilidad de estos.

Al ser un programa independiente, debe ocuparse de toda la lógica del proceso y de proveer todas las funcionalidades necesarias, por lo que su tamaño es generalmente mayor.

Los clientes pesados suelen permitir el uso de datos **no procedentes del acceso a servicios**, tales como datos en ficheros locales, y no están pensados exclusivamente como clientes, sino como aplicaciones más amplias que además disponen de capacidades para aprovechar un determinado tipo de servicios. En la actualidad, la **práctica totalidad de SIG de escritorio** son a su vez clientes pesados, ya que pueden consumir servicios tales como los descritos previamente en este apartado.

- **Cliente ligero.** Se denomina *ligero* por el tamaño relativamente reducido del programa en sí, lo cual va consecuentemente asociado a unas capacidades limitadas. Hablamos de clientes ligeros cuando nos referimos a *Web Mapping* y a clientes que se ejecutan sobre un navegador Web, ya que estos suelen ser sencillos en cuanto a sus funcionalidades.

No obstante, los clientes Web empiezan progresiva-

mente a ampliar sus posibilidades, y en ello juegan un importante papel otros **servicios distintos a los de mapas o los de datos**, como pueden ser los de procesos. Estos permiten que las funcionalidades adicionales no se implementen en el propio cliente (y por tanto sin aumentar en exceso su tamaño y sin disminuir su «ligereza»), sino que sean accedidas también como servicios remotos.

La **edición de capas** es otra capacidad que puede aparecer en los clientes Web con funcionalidad más avanzada.

La evolución de la cartografía Web en esta dirección se dirige desde el *Web Mapping* al denominado **Web GIS**, en el que la aplicación Web incluye la totalidad de capacidades clásicas del SIG de escritorio.

ALGUNAS TÉCNICAS RELACIONADAS CON SERVICIOS SIG

Dos técnicas básicas que se emplean actualmente en los clientes que manejan información geográfica son el *tiling* y el *cacheo*. Estas técnicas permiten que la experiencia de trabajar con un cliente SIG, ya sea este ligero o pesado, sea más agradable, logrando una mayor fluidez y superando en cierta medida las limitaciones de la red.

Ambas técnicas se utilizan en servicios en los que el servidor provee imágenes, ya que es en estos en los que resultan aplicables, y también donde es más necesario recurrir a este tipo de técnicas.

El *tiling* es una técnica consistente en dividir las imágenes con las que se trabaja en imágenes menores que formen un mosaico. Esto permite un trabajo más rápido, al utilizar unidades mínimas de menor tamaño

y poder reducir la necesidad de transmitir datos a través de la red si se realiza una gestión correcta del conjunto de elementos de ese mosaico. En lugar de transmitir una única imagen se transmiten varias de menor tamaño y la información correspondiente a la posición relativa de estas.

El *cacheo*, por su parte, es una técnica no exclusiva del ámbito SIG, sino de la Web en general, y consiste en almacenar de forma temporal los datos obtenidos de un servidor en la máquina local. De este modo, si volviera a resultar necesario acceder a esos datos, no han de pedirse al servidor, sino que pueden recuperarse de la copia local, con las ventajas que ello tiene en cuanto a la velocidad de acceso y la fiabilidad del proceso.

El uso conjunto de *tiling* y *cacheo* puede disminuir sensiblemente el volumen de datos a transmitir para, por ejemplo, modificar el encuadre de un mapa en una aplicación SIG Web. La figura 6.6 muestra un ejemplo sencillo que servirá para comprender el ahorro de datos que puede conseguirse con el uso conjunto de estas técnicas.

Inicialmente, la aplicación encuadra una región que cubre 20 elementos o teselas. Si el usuario desplaza el encuadre para que cubra otro área distinta, como en el caso mostrado en la figura, el cliente realizará una nueva petición y obtendrá una nueva imagen, que tendrá exactamente el tamaño con que esa imagen va a representarse. Este es exactamente el mismo tamaño que la imagen que encontramos inicialmente en el encuadre original, y por tanto la representación de este encuadre original y posteriormente el encuadre modificado requiere transmitir dos imágenes que cubren cada una de ellas veinte teselas.

Si, por el contrario, aplicamos conjuntamente las

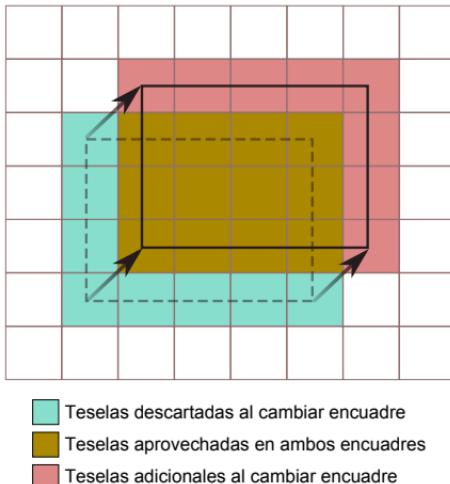


Figura 6.6: Esquema del uso de *tiling* y *cacheo* para optimizar la transmisión de datos en una aplicación SIG Web

técnicas anteriores de *tiling* y *cacheo*, al variar el encuadre no es necesario obtener del servidor una imagen que cubra todo el área a representar, sino tan solo los 8 elementos correspondientes a la zona no cubierta por la imagen inicial, ya que los restantes ya habrán sido obtenidos con anterioridad y se encontrarán almacenados (*cacheados*) en nuestro ordenador. Es decir, el cliente crea la imagen a representar con 8 subimágenes pedidas al servidor y otras 12 ya descargadas previamente, reduciendo sensiblemente el volumen de datos pedidos al servidor.

Una técnica de reciente aparición es la denominada **tiling vectorial**. Aplicando los mismos principios que el *tiling*, es decir, la subdivisión de los datos de forma regular, las capas vectoriales se «trocean» en el origen y se envían después solamente los datos necesarios para

el área cubierta en el cliente. Combinando este enfoque con el uso de capas con distinto detalle según la escala, se logran dos ventajas:

- Disminución del volumen de datos.
- Capacidad de modificar la simbología en el cliente.

Al enviar los datos en lugar de una representación de estos, **el cliente es quien debe establecer la simbología**. Al mismo tiempo, se logran ventajas en la experiencia de usuario, debidas principalmente a la escalabilidad de los datos vectoriales, que permite por ejemplo presentar transiciones más fluidas cuando se modifica la escala del mapa.

Obviamente, este tipo de enfoque es válido únicamente para el caso de capas vectoriales.

ESTÁNDARES

Para garantizar el buen funcionamiento de un sistema cliente–servidor, es importante definir de forma adecuada cómo se establece la comunicación entre clientes y servidores. Esto obliga a establecer una cierta **normalización** y crear elementos que sean conocidos e implementados por las distintas partes. Esta *lingua franca* es lo que denominamos un **estándar**.

En circunstancias ideales, debe existir una total **interoperabilidad** con independencia de los formatos y las aplicaciones empleadas, pudiendo interactuar entre sí los distintos clientes y servidores. Los estándares son el elemento que va a permitir esa interoperabilidad, definiendo el marco común que clientes y servidores emplearán para entenderse. Los estándares son los encargados de aportar **homogeneidad tecnológica**.

La interoperabilidad implica que podemos sustituir unos elementos del sistema en el que se incluyen los clientes y servidores por otros distintos, teniendo la seguridad de que van a interaccionar entre ellos sin dificultades. Las funcionalidades que un cliente o servidor nos ofrece pueden ser distintas a las de otro, pero independientemente de su origen (independientemente del fabricante), si esos elementos implementan un estándar dado, siempre podrán interactuar con todos aquellos que también lo implementen.

Un estándar se considera como tal cuando es empleado por un grupo o comunidad, que lo acepta para la definición de las características de ese producto o servicio en su seno. Si únicamente es el uso del estándar el que lo ratifica como tal, se denomina estándar *de facto*. Existen estándares que se convierten en normas o estándares *de iure*, cuando estos son promovidos por algún organismo oficial de normalización o su uso se impone con carácter legal.

Un estándar *abierto* es aquel **cuya definición se encuentra disponible** y todo aquel que lo desee puede conocerla y emplearla para el desarrollo de la actividad relacionada con ese estándar.

Los principios fundamentales de los estándares abiertos son los siguientes [?]:

- **Disponibilidad.** Los estándares abiertos están disponibles para todos el mundo para su lectura y uso en cualquier implementación.
- **Máxima posibilidad de elección para los usuarios finales.** Los estándares abiertos crean un mercado competitivo y justo, y no bloquean a los usuarios en el entorno de un vendedor particular.
- **Gratuidad.** Implementar un estándar es gratuito,

sin necesidad de pagar, como en el caso de una patente.

- **Discriminación.** Los estándares abiertos y las organizaciones que los desarrollan no favorecen de ningún modo a uno u otro implementador sobre los restantes.
- **Extensión o creación de subconjuntos de un estándar.** Los estándares abiertos pueden ser extendidos o bien presentados como subconjuntos del estándar original.
- **Prácticas preditorias.** Los estándares abiertos pueden tener licencias que requieran a todo aquel que desarrolle una extensión de dicho estándar la publicación de información acerca de esa extensión, y el establecimiento de una licencia dada para todos aquellos que creen, distribuyan y vendan *software* compatible con ella.

Para tener una noción de lo que en la práctica realmente significa el uso de estándares abiertos en el campo de los SIG, podemos ver la figura 6.7, donde se representa el esquema de una arquitectura no interoperable. Es decir, una arquitectura que no se basa en este tipo de estándares.

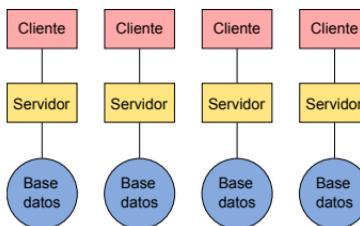


Figura 6.7: Esquema de una arquitectura no interoperable.

Los datos que se encuentran en cada base de datos son accesibles únicamente a través de un único

cliente, que es aquel correspondiente al servidor que ofrece servicios basados en esos datos. Los restantes datos quedan fuera del alcance de ese cliente, ya que no es capaz de acceder a ellos. Las diferentes soluciones cliente–servidor crean en esta situación un conjunto de islas tecnológicas, cada una completamente independiente y sin posibilidad alguna de interactuar con las restantes.

Entre los principales inconvenientes de una arquitectura no interoperable como la representada podemos citar los siguientes:

- **Desperdicio de recursos.** Cada servicio debe gestionar sus propio conjunto de datos, lo cual requiere abundantes recursos y no es sencillo, además de implicar un elevado coste.
- **Necesidad de conocer múltiples clientes.** Si para acceder a cada servicio necesitamos su cliente particular, acceder al conjunto de servicios ofrecidos por esos servidores requiere por parte de los usuarios aprender a utilizar tantos clientes como servidores existan.
- **Imposibilidad de combinar datos.** Dos datos a los que pueda accederse a través de dos servidores distintos no podrán utilizarse simultáneamente en un único cliente, ya que este no podrá comunicarse con ambos servidores.
- **Imposibilidad de combinar funcionalidades.** Si acceder a los datos a través de un servidor solo se puede hacer empleando un cliente concreto, no existe la posibilidad de aprovechar las funcionalidades de otro cliente sobre esos mismos datos, y el usuario ve así limitadas sus posibilidades de trabajo.

En contraste con lo anterior, tenemos una situación

de plena interoperabilidad basada en estándares abiertos como la representada en el esquema de la figura 6.8.

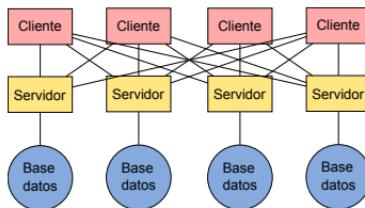


Figura 6.8: Esquema de una arquitectura interoperable.

En este caso, existe un servidor que es el que gestiona y ofrece los servicios para cada base de datos, pero a él pueden acceder todos los clientes, ya que por el hecho de estar basados en estándares abiertos es posible una comunicación plena entre dos cualesquiera de ellos.

Principales estándares

Los estándares más habituales en el campo de la información geográfica son elaborados por el **Open Geospatial Consortium (OGC)**. OGC es una organización internacional y voluntaria dedicada a la elaboración de estándares en el ámbito de los contenidos geoespaciales.

Algunos de los estándares OGC más relevantes son los siguientes:

- **WMS.** Para obtener imágenes de mapas.
- **WCS.** Para obtener y consultar coberturas (capas ráster).
- **WFS.** Para obtener y editar entidades geográficas y sus atributos asociados (capas vectoriales).

- **WPS.** Para servicios de procesos remotos.
- **GML.** Para almacenamiento de información geográfica.
- **CSW.** Para consultas en catálogos.

Cada uno de estos estándares está descrito en una especificación, y estas están sujetas a cambios y mejoras, existiendo varias versiones en cada caso.

Junto a estos estándares, encontramos los elaborados por otras organizaciones como **ISO** o **W3C**, de ámbito más general, pero que también tienen importancia en el ámbito SIG. Entre ellos, destacar los estándares ISO encargados de definir el **formato de almacenamiento de metadato**, o los estándares de W3C para la **comunicación en Internet**.

SIG MÓVIL

A lo largo de la historia de los SIG, han ido surgiendo nuevas tecnologías como consecuencia de los cambios que se han producido en los dispositivos sobre los que las aplicaciones de manejo de información geográfica pueden ejecutarse. La aparición de nuevo *hardware* es seguida de cerca por los desarrolladores de *software*, que adaptan sus aplicaciones para aprovechar las nuevas características de esos dispositivos. Esto, además de impulsar el avance de las aplicaciones SIG al permitirles mayor potencia de proceso o mayores capacidades, en ocasiones trae consigo la aparición de ramas completamente nuevas cuando la tecnología de los dispositivos da un salto cualitativo de grandes proporciones.

En el veloz avance que el *hardware* sufre constantemente, uno de los cambios más radicales de los últimos

tiempos es la cada vez mayor potencia y disponibilidad de elementos portátiles. Esto ha propiciado la aparición del denominado *SIG móvil*, así como una serie de tecnologías y herramientas relacionadas que van dando forma a un sector muy distinto de lo que el SIG clásico representa, pero con una innegable vinculación con este.

La implicación que estas nuevas tecnologías han tenido en el ámbito del SIG va más allá de expandir sus posibilidades. Como vimos en el capítulo dedicado a la historia de los SIG, los primeros programa SIG se ejecutaban sobre grandes máquinas cuya adquisición estaba muy lejos del alcance del público especializado, como sucedía con toda la tecnología informática de aquél entonces. El salto a los ordenadores personales fue decisivo para iniciar una popularización de los SIG y contribuir a que se convirtieran en herramientas imprescindibles en una buena parte de sus ámbitos de aplicación, entrando con fuerza en muchos sectores.

Con la aparición de los dispositivos móviles y el crecimiento del mercado en torno a ellos, los SIG han dado un nuevo salto cualitativo. No solo han alcanzado un nuevo tipo de dispositivos con capacidades muy interesantes relacionadas con la información geográfica (destacando entre ellas la capacidad de conocer la posición del dispositivo), sino también a un nuevo público y a nuevos grupos de interés. Si con el salto a los ordenadores personales los SIG se hicieron más asequibles en términos económicos y de especialización informática, con la entrada de los dispositivos móviles se han hecho asequibles en lo que a conocimientos específicos del ámbito geográfico y cartográfico respecta. La información geográfica se abre paso en un mercado no especializado y, no solo su uso, sino también su crea-

ción, pasan ambos a ser actividades no exclusivas de los profesionales de este campo. Es un paso más allá en la labor que desde sus orígenes los SIG vienen realizando, esto es, facilitar el uso de información geográfica y dar presencia a esta en todos los terrenos, haciendo ver la importancia que tiene en la práctica totalidad de ámbitos.

Algunas de las tecnologías y utilidades que aparecen con los SIG móviles distan mucho de la idea clásica de SIG, y constituyen de por sí un territorio nuevo que difiere notablemente de cuanto hemos visto hasta el momento. No obstante, la relevancia que estas tecnologías han adquirido y, sobre todo, la que van a adquirir en los próximos años, las hace merecedoras de un capítulo propio en este libro y de ser consideradas como parte muy importante del panorama actual del SIG.

QUÉ ES EL SIG MÓVIL

Comencemos viendo qué entendemos por SIG móvil y de qué formas puede presentarse. Para ello, analicemos como hemos hecho en otros apartados una situación habitual en el entorno de trabajo de un SIG, en particular la relativa a la creación de datos geográficos. Según vimos en el capítulo 5, una de las formas de obtener datos con los que trabajar en un SIG es la toma de estos directamente en campo y su posterior incorporación dentro del SIG. Esto requería habitualmente la digitalización de los datos tomados, ya que dicha toma se desarrollaba en la mayor parte de los casos mediante medios analógicos.

Una importante mejora en este proceso se daría si la recogida de datos se efectuara empleando medios

digitales, ya que el resultado sería mucho más cercano a lo que posteriormente va a necesitarse para el trabajo en gabinete. Además de esta ventaja inmediata y del ahorro de tiempo que traería consigo, existen otras ventajas directas que los medios digitales aportarían. Por ejemplo, si en lugar de un dispositivo de toma de datos contamos con dos de ellos, es relativamente sencillo (especialmente si los dispositivos pueden comunicarse entre sí) replicar los datos tomados, teniéndose así una copia de seguridad que evitará en gran medida la pérdida de los datos tomados por circunstancias diversas. El software instalado en el dispositivo puede a su vez contar con elementos que efectúen algún tipo de control de calidad, asegurándose de que no se introducen por descuido valores erróneos o de que no se deja sin llenar ningún campo de un estadillo.

No obstante, y a pesar de que esa recogida de datos se realiza con el fin de tratar estos posteriormente con ayuda de un SIG, el SIG como tal no participa en el proceso de toma de datos, sino tan solo en el trabajo de gabinete. Los dispositivos que se lleven al campo, sean del tipo que sean, simplemente recogen una serie de valores introducidos por el operario correspondiente, del mismo modo que este los anotaría en una libreta o estadillo. Sin embargo, nada impide que podamos llevar al campo una aplicación SIG (por ejemplo, un SIG de escritorio), y que sea en ese SIG, adaptado a esa particular tarea o no, donde tomemos los datos y en el que nos apoyemos para realizar todas las tareas adicionales que el trabajo de campo requiere.

Llevar el SIG al campo y sacarlo de su lugar fijo en el gabinete es lo que da lugar al denominado *SIG móvil*, cuyas particularidades, como veremos, van más allá del mero hecho de una localización de trabajo dis-

tinta. Cuando hablamos de SIG móvil, no nos referimos únicamente a un SIG habitual ejecutándose en una plataforma móvil, sino también a una filosofía distinta a la que existe en el uso de otros elementos tecnológicos del ámbito SIG que ya conocemos, en una localización fija. Es decir, llevar el SIG al campo no conlleva tan solo un cambio físico del entorno de trabajo, sino también una notable adaptación en otros aspectos.

Hoy en día son muchos los dispositivos que podemos emplear para disponer de una herramienta móvil con capacidad de proceso. Sin ir más lejos, un ordenador portátil con una conexión inalámbrica a Internet (empleando telefonía móvil de tercera generación) nos serviría para replicar en campo el entorno de trabajo de un SIG de escritorio, poniendo a nuestra disposición todas las capacidades de este. Esta solución, no obstante, es poco práctica, ya que, si bien es cierto que podemos «mover» un ordenador portátil con relativa facilidad, no es un dispositivo pensado para moverse mientras se encuentra en funcionamiento, con lo que más bien tendríamos un *SIG portátil* en lugar de un *SIG móvil*. Hay otros tipos de *hardware* mucho más adecuados para este cometido, como pueden ser los siguientes (Figura 6.9):

- Unidades GPS (a).
- Teléfonos móviles (b).
- Tabletas (c).

Las características de estos dispositivos son distintas a las de un ordenador de sobremesa en el que utilizamos el *software* SIG que hemos visto hasta ahora, haciendo que deba desarrollarse software específico y que deban tenerse en cuenta algunas consideraciones



Figura 6.9: Distintos tipos de dispositivos móviles

adicionales. A su vez, cada uno de los anteriores dispositivos tiene unas capacidades propias que lo hacen más interesante para unas u otras tareas dentro del trabajo en campo.

Así, las tabletas o los teléfonos móviles de tipo *smartphone* pueden considerarse como versiones reducidas de un ordenador de sobremesa o un ordenador portátil, y aunque en términos de capacidad de almacenamiento y velocidad de proceso están por debajo de estos, son dispositivos de gran potencia que en muchos casos pueden ejecutar aplicaciones complejas o que requieran la realización de procesos intensos.

Por su parte, los teléfonos móviles son los dispositivos versátiles por excelencia y su penetración es muy superior a la de cualquier otro.

Las unidades GPS más básicas se limitan a mostrar la localización, disponiendo de funcionalidades reducidas. Las más completas, no obstante, incorporan capacidades más cercanas a las de una tableta o *smartphone*, con posibilidad de ejecutar aplicaciones complejas tales como un SIG adaptado. El interés de la tecnología GPS está, sin embargo, en considerarla como una tecnología adicional que enriquece a algu-

nos de los dispositivos anteriores. Así, tanto teléfonos móviles como las tabletas (o incluso otros dispositivos como cámaras fotográficas) pueden incorporar receptores GPS y disponen por tanto de información acerca de su posición. Esta combinación es la que da como resultado los dispositivos más potentes para el SIG móvil, ofreciendo todas las funcionalidades que iremos viendo a lo largo de este apartado.

Asimismo, la conexión remota a Internet, que a día de hoy presenta un avanzado estado de desarrollo, abre la puerta a muchas de las capacidades más potentes y novedosas del SIG actual, como pueden ser la consulta o incluso la edición de cartografía, según vimos en el capítulo ??.

Para dar una definición más formal de lo que entendemos por SIG móvil, podemos decir que es una tecnología que integra una o más de las siguientes [?]:

- Dispositivos móviles.
- Sistemas de posicionamiento global (GPS).
- Acceso inalámbrico a Internet.

Por su parte, [?] distingue tres elementos principales que dan forma al contexto de las aplicaciones SIG móviles: SIG, Internet, y dispositivos móviles y Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación (NTIC). La figura 6.10 esquematiza esto.

Figura 6.10: Clasificación de aplicaciones del ámbito del SIG móvil en función de las tecnologías empleadas (según [?])

En el centro, como tecnologías aglutinadoras de las anteriores, encontramos los *Servicios Basados en*

Localización (LBS¹). En general, se suelen recoger bajo esta denominación los servicios que toman en consideración la posición del usuario, y en los que se produce la participación de un tercero, el encargado de proveer el servicio como parte fundamental de un negocio. Dichos servicios pueden ir desde la localización del comercio más próximo hasta el envío de avisos cuando se encuentre cerca de otro usuario conocido.

Podemos, con lo anterior, tener así una primera y muy general clasificación de las áreas de aplicación del SIG móvil en los dos siguientes grupos:

- SIG «en campo». Se centra más en los trabajos propios del SIG y en la recolección y edición de datos.
- Servicios Basados en Localización. Servicios ofrecidos por terceros en función de la posición del dispositivo y del usuario.

En los LBS, la persona con el dispositivo es consumidor del servicio, mientras que en el SIG en campo su papel es principalmente como operario del SIG, y por tanto es esa persona la que provee un servicio o realiza una tarea apoyado en él. Se tiende a concebir el LBS como un servicio no especializado cuyo consumidor no ha de estar necesariamente formado en las tecnologías SIG, mientras que en el caso del SIG en campo sí que debe tener unos conocimientos mínimos, ya que su labor se desempeña sobre una aplicación SIG como tal. De los elementos que hemos comentado como integrantes del SIG móvil, el LBS da mayor importancia al acceso a Internet y a la posición del dispositivo, dejando algo más de lado las capacidades clásicas del SIG. El SIG en

¹ *Location-Based Services*

campo, por su parte, hace énfasis en esas capacidades, complementándolas con la movilidad del dispositivo y su capacidad para calcular su posición.

En nuestro supuesto con el que comenzábamos esta sección, la toma de datos para ser posteriormente incorporados en un SIG, nos encontraríamos en un claro caso de SIG en campo. Este tipo de enfoques surgieron antes que los LBS, ya que las tecnologías necesarias para estos últimos aparecieron con posterioridad. El SIG en campo no requiere obligatoriamente una conexión inalámbrica, tecnología de muy reciente aparición y, sobre todo, de muy reciente implantación y desarrollo. La llegada de esta tecnología, sin embargo, añadió nuevos elementos al SIG móvil, y a día de hoy es la cabeza visible de este ámbito, especialmente por la gran expansión que ha supuesto para las tecnologías SIG. Como mencionábamos en la introducción del capítulo, la popularización del SIG y sus elementos es el verdadero aspecto destacable del SIG móvil.

Pese a lo anterior, la frontera entre estos dos grupos es difusa en cierto modo, ya que puede realizarse trabajo de campo aprovechando servicios de terceros a través de Internet, y el usuario que aprovecha estos servicios (que pueden a su vez ser muy especializados) puede tener amplios conocimientos de SIG y realizar un trabajo altamente técnico. En relación con cuanto hemos visto en otras partes del libro, el SIG en campo está, a primera vista, más vinculado con todo ello, ya que el perfil de su usuario es más similar al del clásico usuario de SIG. La importancia que los LBS están teniendo es, no obstante, mucho mayor, ya que alcanza a todo el ámbito del SIG y también a grupos de usuarios muy alejados de ese perfil tradicional.

Independientemente de la naturaleza de la actividad

realizada con un SIG móvil, está claro que este tiene unas particularidades que lo diferencian del SIG como hasta ahora lo hemos conocido, y que son las que, en gran medida, le confieren su potencia específica como herramienta para trabajo sobre el terreno.

PARTICULARIDADES DEL SIG MÓVIL

Los siguientes son algunos de los principales aspectos a considerar que caracterizan al SIG móvil y lo diferencian del SIG clásico sobre una plataforma estática [?]:

- **Variedad de plataformas.** Mientras que en caso de un SIG que se ejecuta en un ordenador de sobremesa las diferencias de plataforma son prácticamente inexistente (con, tal vez, la única salvedad del sistema operativo), en el caso del SIG móvil la situación es muy diferente. Existen plataformas muy diversas y dispositivos con características completamente distintas (por ejemplo, un teléfono móvil es, en ciertos aspectos, radicalmente distinto a un Tablet PC). Garantizar que todos estos dispositivos van a poder funcionar con una aplicación requiere un esfuerzo extra a la hora de desarrollar esta.
- **El usuario es parte de la información.** El SIG nos permite analizar información muy variada, pero los análisis que realizamos se basan en unos datos concretos, ya sean estos locales o remotos. La posición de la máquina donde se ejecuta el SIG no es relevante ni tenida en cuenta, y ni siquiera existe la posibilidad de conocer y utilizar esta. En el SIG móvil, por el contrario, la posición del dispositivo es conocida (si este integra algún tipo de mecanismo

para calcular está, de entre los que veremos más adelante en esta misma sección). Esa posición no solo puede ser empleada como otro dato más, sino que, en muchos casos, es el dato más importante y el que permite ofrecer servicios personalizados en función de dicha posición. Indirectamente, el usuario se convierte también en parte de la información, ya que es *su* posición la que ahora forma parte de esta.

- **Acceso variable.** La calidad del acceso a Internet va a fluctuar notablemente para un mismo conjunto de dispositivo, aplicación, y usuario, ya que se trata de un servicio muy variable en función de la localización.
- **Limitaciones de los dispositivos.** Comparados con un ordenador de sobremesa, que representa el dispositivo estándar en el que un SIG se ejecuta tradicionalmente, los dispositivos móviles presentan importante limitaciones. Las más destacable de ellas es su propio tamaño, ya que las pantallas son pequeñas y obligan a un uso distinto de su espacio para poder mostrar en ellas todos los elementos necesarios para garantizar una correcta usabilidad de las aplicaciones. Otras limitaciones son las ya mencionadas de almacenamiento y proceso. Y, por último, deben considerarse también las limitaciones en los dispositivos de entrada, muy distintos de los habituales teclado y ratón, y sin apenas posibilidad de contar con otros periféricos más específicos.
- **Escalabilidad de los datos.** Por las propias características tanto de los dispositivos como de sus conexiones, es necesario poner atención en la escalabilidad de los datos para que las aplicaciones funcionen en circunstancias variadas, modificando el detalle en función de las situación.

APLICACIONES DEL SIG MÓVIL

Para estudiar las posibilidades que el SIG móvil nos brinda, podemos analizar el papel que la información geográfica juega en el trabajo de campo. De este modo, descubriremos en qué fases de este existirán diferencias si podemos contar con una herramienta con las capacidades de un SIG, ampliada además con otros elementos tales como un sistema GPS incorporado en el dispositivo. Entendemos aquí trabajo de campo no en el sentido tradicional, sino como cualquier actividad desarrollada al aire libre en la que pueda aplicarse de algún modo un SIG móvil, y que no necesariamente ha de constituir un «trabajo» como tal.

Por una parte, la información geográfica es una herramienta en la que nos apoyamos para desarrollar la actividad en cuestión. Es decir, *usamos* la información geográfica de forma directa. Así sucede, por ejemplo, cuando debemos tomar datos en una localización concreta como por ejemplo una parcela de inventario en un inventario forestal o un punto de alcantarillado para realizar un control del estado de una red de saneamiento. También hacemos un uso similar cuando buscamos el restaurante más próximo o queremos encontrar el camino más rápido para tomar una carretera desde nuestro emplazamiento actual.

Tradicionalmente, la información geográfica se ha llevado al campo en forma de mapas impresos. Consultando estos se encontraba el lugar seleccionado y la forma de desplazarse hasta él. Empleábamos mapas topográficos para encontrar esa parcela de inventario, callejeros para localizar la alcantarilla o un mapa de carreteras para saber cómo desplazarnos en coche. Con el SIG móvil, la información geográfica «viaja» al campo

en formato digital, almacenada dentro del propio dispositivo o bien accediendo mediante este a información remota a través de Internet. Esto ofrece ventajas tales como una mayor comodidad o como la posibilidad de tener varios dispositivos que compartan la cartografía. Es decir, varios técnicos que trabajen en campo pueden «llevar» el mismo mapa sin necesidad de tener varias copias de este, sino tan solo varias «copias» del dispositivo, que es por otra parte el mismo que emplearán para la toma de datos o para cualquiera de las restantes tareas de su trabajo.

Por otra parte, la información geográfica en sí puede ser parte de la información recogida en campo. Es decir, es objeto de interés directo del trabajo de campo, y no solo un medio para realizar este. En este caso, los dispositivos móviles van a permitir recoger con más precisión cualquier tipo de dato espacial sobre el terreno, al mismo tiempo que facilitan la creación de dicho dato espacial o la edición de uno ya existente en función de lo observado. Se unen en este punto la capacidad del dispositivo para conocer las coordenadas de su localización y las capacidades de las aplicaciones SIG para edición de datos, así como las propias ventajas de los datos digitales en lo que a su actualización respecta (véase ??).

Esta es una de las razones principales del auge actual de los proyectos colaborativos para la creación de cartografía (véase 5). Los complejos y caros equipos empleados en la cartografía clásica pueden sustituirse en muchos casos por dispositivos simples como un teléfono móvil o una unidad GPS de consumo, ambos sencillos de manejar para el usuario no especializado. Este puede así tomar información geográfica y aportarla a algún proyecto comunitario, o bien guardarla para

su uso personal.

Con las ideas anteriores, podemos localizar las principales tareas que el SIG móvil va a desarrollar en los distintos ámbitos de aplicación y dividirlas en dos bloques: aquellas que permiten a los usuarios optimizar su movilidad durante el trabajo de campo, y aquellas que facilitan el desarrollo de la labor en cuestión una vez que se ha posicionado correctamente.

Con respecto a las relacionadas con la movilidad, no se ha de pensar que estas se limitan a la localización de un emplazamiento puntual como se ha mencionado anteriormente, en lo que sería un uso casi exclusivo del sistema de posicionamiento del dispositivo. También el análisis, parte importante de un SIG, puede servir para mejorar el desplazamiento que el trabajo en campo conlleva. El cálculo de rutas es el principal ejemplo en este sentido, tal y como se implementa en los navegadores GPS, aunque no el único. Elaborar un plan de ruta en tiempo real puede ser útil para muchos profesionales, que pueden hacer uso de algoritmos como el del «problema del viajante» si estos se encuentran implementados en su SIG móvil.

Dentro de las actividades que facilitan la labor en campo son de especial interés las relacionadas con la captura de información geográfica, que se simplifica notablemente como ya hemos dicho. Asimismo, también debemos citar cualquier tipo de servicio al que pueda accederse mediante la conexión inalámbrica del dispositivo y proporcione información complementaria o algún tipo de apoyo a la persona que opera con este. Y por último, no ha de olvidarse el análisis SIG como una herramienta con gran utilidad, ya que permitirá realizar procesos adicionales que pueden añadir nuevas posibilidades, tales como, por ejemplo, la validación en

tiempo real de los datos recogidos.

La siguiente lista resume algunas de las actividades principales que pueden llevarse a cabo con un SIG móvil. Algunas de ellas pueden desarrollarse sin necesidad de contar con todos los elementos posibles (dispositivo, conexión inalámbrica y sistema de posicionamiento), aunque buena parte requieren el concurso de todos ellos.

- **Navegación.** Cálculo de ruta óptima entre dos puntos, guiado en interiores (centros comerciales, museos, etc.), aparcamiento guiado, gestión de tráfico. Una de las actividades más populares y extendidas.
- **Inventario.** Recogida de datos de cualquier tipo sobre el terreno. Cubre desde datos de inventarios forestales a prospecciones arqueológicas, pasando por datos censales o infraestructuras urbanas, entre muchos otros.
- **Información.** Páginas amarillas espaciales o guías de viaje virtuales. En general, cualquier servicio de mapas o de puntos de interés con posición (monumentos, tiendas, aparcamientos...) accesible desde un dispositivo móvil.
- **Emergencia.** Localización de situaciones de emergencia, asistencia a vehículos, optimización de asistencias y tiempos de respuesta. El usuario, ante una emergencia, puede conocer su posición e informar de ella, o bien a través de la red puede conocerse esta y emplearse para dar una respuesta óptima y una ayuda lo más eficiente posible.
- **Publicidad.** Anuncios basados en localización, indicación de negocios cercanos, promociones para comercios próximos. Existen algunas limitaciones para evitar la publicidad no deseada, pero si el usuario

da permiso, puede recibir información sobre posibilidades comerciales en su entorno.

- **Seguimiento.** Tanto de personas como de productos, a lo largo de rutas predefinidas o no. También puede servir para monitorizar una actividad en las distintas localizaciones por las que pase el usuario. Por ejemplo, una compañía telefónica puede estudiar los patrones de comportamiento en lo que al acceso a la red respecta, según el emplazamiento desde el que se accede.
- **Gestión.** Por ejemplo, de infraestructuras, de instalaciones, o de flotas. El dispositivo puede ir sobre el elemento a gestionar o bien emplearse para llegar hasta él y efectuar allí algún tipo de control.
- **Ocio.** Buscadores de amigos o juegos con componente espacial, entre otros.

MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO

Uno de los elementos clave del SIG móvil es la capacidad de conocer la posición del dispositivo en todo momento, incorporando, como ya hemos visto, esa posición como un dato más de particular relevancia para realizar otras operaciones habituales del SIG o para ofrecer servicios de diversos tipos. Si el dispositivo en cuestión es una unidad GPS, está claro que dispone de un sistema para obtener su posición, igual que sucede si se trata de otro tipo de dispositivo pero con un receptor GPS incorporado. Sin embargo, existen otras formas de que el dispositivo conozca su posición, y pueden emplearse de igual modo para obtener resultados similares en cuanto a las prestaciones que van a permitir.

Los métodos mediante los cuales puede determinar-

se la posición de un dispositivo pueden clasificarse en tres tipos, a saber:

- Introducción manual de la posición.
- Métodos basados en red.
- Metodos basados en terminal.

La introducción manual es el método más obvio y simple que, no obstante, puede implicar también el uso de algún tipo de tecnología y requiere algunas matizaciones. Además de introducir directamente en el dispositivo las coordenadas actuales de este, es posible establecer una posición mediante la denominada *geocodificación inversa*. En el capítulo ?? veíamos que mediante la geocodificación asignábamos coordenadas a un determinado elemento, que podía ser un punto dado o cualquier otro elemento susceptible de ser georreferenciada. Aplicando este razonamiento de forma inversa, y si disponemos una base de datos con un conjunto de esos elementos y sus coordenadas asociadas, podemos obtener estas últimas haciendo búsquedas en esa base de datos con el nombre del elemento. Es decir, podemos decirle al dispositivo que la posición actual es *Badajoz* o *Estadio Vicente Calderón* y él se encargará de convertir esa información en una coordenada numérica similar a la que se obtendría si tuviera instalado un receptor GPS o alguna otra tecnología similar.

Algunos servicios de consulta de los que presentábamos en el capítulo ?? permiten este tipo de operaciones, y devuelven coordenadas asociadas a un determinado fenómeno geográfico. En particular, los denominadas servicios de *Nomenclator* son los encargados de ello, como veremos con más detalle en el apartado ??.

Con respecto a los dos tipos restantes, ambos se apoyan en una red de estaciones cuyas posiciones son

conocidas. Los basados en red obtienen su posición mediante cálculos realizados en función de una señal emitida por el dispositivo. El método más habitual de esta clase es el empleado por los teléfonos móviles para calcular su posición en función del repetidor más cercano de entre los que le ofrecen cobertura.

Por el contrario, en los métodos basados en terminal es el propio dispositivo el que recibe la señal que procede de las estaciones, y en función de estas calcula su posición. El sistema GPS es el ejemplo más popular de un método de esta última clase. Existen asimismo métodos combinados que emplean ambas técnicas para el cálculo posicional.

La figura 6.11 esquematiza lo anterior.

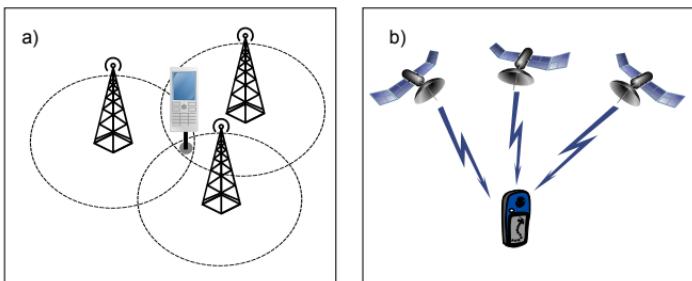


Figura 6.11: Metodos de posicionamiento basados en red (a) y en terminal (b)

Con independencia del tipo de método, el proceso de cálculo de posición sigue un esquema como el siguiente:

- La posición de las estaciones es conocida.
- La información de la señal se transforma en una distancia (a excepción de si se aplica la técnica conocida como Ángulo de Llegada, que veremos seguidamente).

- La posición se calcula conociendo las distancias a un número dado de estaciones base.

Esto coincide con lo que ya vimos en el apartado 5 dedicado al sistema GPS.

Para convertir la información de la señal en una posición, encontramos diversas técnicas, a saber:

- Celda de Origen (Cell of Origin, COO). Se identifica la estación base más cercana y con ello se sabe que el dispositivo se encuentra en el perímetro de esta, dentro de su radio de alcance. La precisión depende de la densidad de la red. Para el caso de telefonía móvil, se sitúa entre los 200 metros y varios kilómetros, por lo que es baja para cierto tipo de servicios.
- Tiempo de Llegada (Time of Arrival, TOA). Se conoce la velocidad de transmisión de la señal y el tiempo entre el envío y la recepción de la señal, con lo que puede calcularse la distancia. Se tiene así la distancia respecto a una estación dada. Considerando la velocidad de transmisión de la señal, son necesarios relojes de alta precisión para lograr un cálculo preciso.
- Diferencia de Tiempo de Llegada (Time Difference of Arrival, TDOA) o Diferencia de Tiempo Observada Mejorada (Enhanced Observed Time Difference, E-OTD). En ambas técnicas se mide igualmente el tiempo, pero el cálculo de la distancia se basa en la diferencia de las señales de tres estaciones, pudiéndose así triangular la posición. En el caso de TDOA el cálculo de la posición lo realiza el proveedor de la red, mientras que en el E-ODT es el dispositivo móvil quien lo hace.
- Ángulo de Llegada (Angle of arrival, AOA), Dirección de Llegada (DOA): Se usan antenas direccionables para detectar el ángulo de llegada.

Estas técnicas pueden emplearse simultáneamente, con objeto de proporcionar una localización más fiable o de adaptarse a las propias circunstancias de la red de estaciones en cada momento.

Es interesante mencionar que la precisión en los métodos basados en terminal es en general mayor que la de los métodos basados en red, siendo así más adecuados para servicios en los que la posición deba conocerse de forma más precisa [?]. Así, el GPS ofrece precisiones mucho mayores que las que se pueden obtener con la identificación de la celda más cercana en una red de telefonía móvil. El GPS es, sin embargo, una técnica pensada para emplearse en exteriores, y los servicios en interior no pueden hacer uso de este, además de requerir una precisión aún mayor. En este caso, métodos basados en redes locales inalámbricas (WLAN), Bluetooth o ultrasonidos son una opción válida, todos ellos también basados en terminal.

REDES INALÁMBRICAS

Uno de los elementos más importantes en el SIG móvil es la conexión inalámbrica, que nos permite el acceso a Internet y poder acceder a todos los tipos de servicios a través de esta. Sin conexión, disponemos de gran cantidad de funcionalidades, en especial aquellas fundamentales para lo que denominábamos SIG en campo. Podemos llevar el SIG móvil y tomar datos, realizar análisis geográficos sobre el terreno o navegar hasta una posición dada. Para ello solo necesitamos los datos que estén almacenados en el propio dispositivo, tal y como sucede en un navegador GPS que contiene su propia cartografía.

Sin conexión a Internet, sin embargo, no se dispone

de capacidad para recibir servicios ni tampoco para acceder a datos remotos o realizar consultas sobre datos de terceros, limitando así de forma notable el alcance del SIG móvil. Siendo la conexión inalámbrica un elemento tan relevante, es necesario conocer algunos fundamentos acerca de su funcionamiento y de cómo los dispositivos habituales en el SIG móvil incorporan la tecnología correspondiente.

Existen dos esquemas principales para clasificar las redes inalámbricas: según la topología de la red y según su alcance

En relación con la topología de la red encontramos dos grupos: aquellas en que la red presenta una infraestructura formada por un número de estaciones inmóviles (nodos) a las que acceden los terminales, y aquellas en las que los propios terminales forman una red *ad-hoc*, siendo ellos mismos los nodos de esta.

Según su alcance, y variando este de menor a mayor, podemos dividir las redes inalámbricas en Redes Inalámbricas de Área Personal (Wireless Personal Area Network, WPAN), Redes Inalámbricas de Área Local (Wireless Local Area Network, WLAN) y Redes Inalámbricas de Área Amplia (Wireless Wide Area Network, WWAN). Esta clasificación se emplea con frecuencia, por lo que veremos los tipos anteriores con algo más de detalle.

Una red WPAN tiene un alcance corto, de unos 10 metros, y utiliza una frecuencia que no requiere de licencia para operar. La mayoría de las redes de este tipo se basan en Bluetooth, y su velocidad de transmisión es de unos 0.5 Mbps.

Por su parte, una red WLAN tiene un alcance mayor, entre 10 y 100 metros, y su velocidad es muy superior, hasta los 100 Mbps. Utilizan también frecuen-

cias sin necesidad de licencia. Las redes inalámbricas de este tipo surgen a partir de las redes locales no inalámbricas (LAN), principales pensadas para la transmisión de datos. Es por ello que esta tecnología está principalmente orientada a la transmisión de datos, y no ofrece soporte para voz como sucede con las redes WWAN.

Una red WWAN cubre un área a distancia de entre 100 metros y 30 kilómetros, y emplea una frecuencia no libre, es decir, una cuyo uso requiere la adquisición de una licencia. Originalmente este tipo de redes se pensaron para transmisión de voz, por lo que su velocidad es baja, 4,8 kbps. La evolución de estas redes para la transmisión de datos ha dado lugar a una segunda generación con mayores velocidades, como sucede con las redes de los sistemas GSM (Global System for Mobile) o GRPS (General Packet Radio Service), con velocidades de 9,6–14 kbps y 20–115 kbps respectivamente. Estas velocidades siguen siendo insuficientes para gran cantidad de aplicaciones, pero las redes de tercera generación, como el sistema UTMS (Universal Mobile Telecommunication System) europeo, pueden alcanzar tasas que permiten operar fluidamente del mismo modo que en una red local.

EL software SIG MÓVIL

Conocemos ya los elementos que integran el SIG móvil y las tecnologías implicadas tales como las redes inalámbricas y los métodos de posicionamiento. Es el momento de ver cómo el *software SIG* se adapta a estas circunstancias y cuáles son las características de las aplicaciones que vamos a encontrar sobre los dispositivos móviles.

Las diferencias entre los SIG de escritorio y los SIG

sobre dispositivos móviles vienen motivadas fundamentalmente por dos razones: las capacidades limitadas de estos (que mencionamos al inicio del capítulo) y las funcionalidades extras que presentan (principalmente la capacidad de posicionamiento). De igual modo, el enfoque y el tipo de uso que se pretenda dar condicionan la forma de las aplicaciones, existiendo una gran diferencia entre las aplicaciones dirigidas a lo que denominábamos SIG en campo y aquellas orientadas a los servicios basados en localización.

Comenzando con las primeras, representan el *software* más similar a los SIG de escritorio, ya que las funcionalidades que resultan de interés son en buena medida aquellas que encontramos en estos. La lectura de datos y su representación son de nuevo los pilares fundamentales entre las capacidades que una aplicación para SIG en campo debe presentar, aunque tanto la edición como el análisis cobran relevancia y se implementan habitualmente para usos particulares. A su vez, tanto la lectura como la representación de datos son dos de las áreas en las que es más necesaria una adaptación debido a las limitaciones del dispositivo.

En el caso de la lectura de datos, la limitada capacidad de almacenamiento y, sobre todo, memoria y velocidad de proceso, plantean un problema a la hora de desarrollar un *software* que se comporte de manera similar a un SIG de escritorio. Aunque el desarrollo de ciertos tipos de dispositivos móviles es rápido y sus capacidades casi alcanzan en algunos casos a las de un ordenador de sobremesa, el manejo de datos voluminosos sigue estando restringido. Este tipo de datos, no obstante, no son necesarios con tanta frecuencia como en el trabajo clásico con un SIG de sobremesa y, dado que otro tipo de funcionalidades están más limitadas, el

rango de actividades que se van a desarrollar con tales datos es más reducido, lo que simplifica el desarrollo de todo lo relativo a su acceso y manejo.

Aunque un SIG móvil era en su concepción inicial un elemento autónomo capaz de contener los datos necesarios para su funcionamiento e incluso incorporar nuevos datos mediante la creación *in situ* de estos, la aparición de las redes inalámbricas ha cambiado esta tendencia y ahora el desarrollo se enfoca hacia el consumo de datos externos a través de la red. Este planteamiento soluciona las dificultades que existen para la lectura de datos de gran volumen, ya que el dispositivo se convierte en un cliente y delega las tareas más costosas al servidor correspondiente.

En los dispositivos de mayor potencia, adecuados para un desarrollo profesional del SIG en campo y para la recogida de datos, el SIG conserva sus capacidades de acceder a datos locales, mientras que en otros menos potentes y especializados, tales como teléfonos móviles, se consumen exclusivamente datos remotos. Algunas aplicaciones con base SIG, tales como navegadores, pueden utilizar cartografía digital almacenada en el dispositivo, pero la aplicación como tal no permite la utilización de otros datos distintos o la lectura de diversos formatos, como sí sucede en un SIG de escritorio.

En lo referente a la representación, la principal diferencia que se ha de considerar a la hora de diseñar un SIG móvil es, como parece lógico, la reducida dimensión de las pantallas. Especialmente a la hora de visualizar datos y aplicar una simbología a estos, se ha de tener en cuenta que existe una limitación de tamaño y que no pueden aplicarse ideas idénticas a las que serían adecuadas para una pantalla de ordenador común, ya

que, al trasladarlas a la del dispositivo móvil, puede obtenerse como resultado un mapa carente de utilidad que no transmite adecuadamente la información geográfica que contiene. Los conceptos de generalización cartográfica que mencionamos en el apartado 3 (por ejemplo, la exageración de elementos) han de tenerse muy presentes en la creación de un SIG móvil.

No solo en la forma de representación existen diferencias, sino también en las propias funcionalidades de visualización incorporadas en la aplicación. Esto está relacionado no únicamente con las limitaciones de la aplicación —podemos decir que, en general, el SIG sobre un dispositivo móvil es una versión más simplificada y menos compleja de un SIG de escritorio—, sino con las necesidades que el usuario va a tener en este aspecto.

Por ejemplo, podemos asumir que un usuario de un SIG móvil va a requerir menos capacidades para establecer una representación particular de los datos espaciales, ya que el trabajo que realiza es menos exigente en ese sentido. Mientras que sobre un SIG de escritorio se elabora cartografía y se trabaja con múltiples capas y en contextos de trabajo muy distintos, un usuario de un SIG móvil emplea la representación visual de los datos como forma de navegación (de modo similar a como emplearía un mapa en papel), o como un apoyo para la edición o toma de datos. En el primer caso, en la representación debe primar la claridad, para facilitar la localización de aquello que busca. Aspectos relativos al análisis visual de la componente temática del dato geográfico no son relevantes, ya que es raro que el usuario efectúe ese tipo de operaciones. En el segundo caso, debe prevalecer la representación clara de aquello que se edita o de los elementos principales

del entorno que van a servir de guía para la edición o creación de nuevos datos.

Aunque también los SIG móviles tienen parte del carácter generalista de los SIG de escritorio, su contexto está más acotado o, al menos, más limitado en cuanto a la extensión de las actividades que pueden llevarse a cabo y las necesidades que van a plantear. Por esta razón, sus funcionalidades, con la visualización en lugar predominante, también se encuentran limitadas.

Gracias al acceso a Internet que se mencionó anteriormente, no solo las tareas de acceso y procesado de datos se delegan en un servidor, sino también las relacionadas con la representación. Por eso, es más habitual que los SIG móviles actúen como clientes de servicios de mapas (es decir, de representaciones ya hechas y listas para visualizarse, como vimos en el apartado ??), y no como clientes de servicios más complejos en los cuales se obtienen los datos y después es la aplicación la que se encarga de formar la representación a partir de ellos.

Esto no quiere decir que este tipo de capacidades no se encuentren en los SIG móviles. De hecho, algunas aplicaciones SIG móviles permiten incluso que la edición de la cartografía sea también un servicio remoto, es decir, que cuando el usuario edite o añada nuevos elementos en su trabajo de campo, estos cambios no tengan lugar en los datos locales que existen en el dispositivo, sino que modifica los presentes en un repositorio remoto. Esta funcionalidad, poco frecuente incluso en los SIG de escritorio más completos, aparece en algunos SIG móviles. No obstante, las posibilidades de representación son menores en el SIG móvil, entendiéndose que no es necesario ofrecer capacidades avanzadas de este tipo.

A modo de ejemplo, y tras lo explicado hasta este punto, se muestra en la figura 6.12 el aspecto de una aplicación SIG móvil.



Figura 6.12: Aspecto de una aplicación SIG móvil (gvSIG Mobile)

En los servicios basados en localización, todo lo anterior tiene lugar de un modo aún más patente, reduciéndose por lo general más aún las funcionalidades. El usuario tiene menos capacidad para «operar» con el dispositivo y con el *software*, y los servicios se diseñan para que sean sencillos de consumir. Los teléfonos móviles, que representan el dispositivo por excelencia para este tipo de aplicaciones, tienen capacidades más reducidas que otros de los adecuados para el SIG móvil, por lo que esta limitación de funcionalidades es también producto del dispositivo al que están orientadas mayoritariamente. La menor especialización de los usuarios influye también en que las aplicaciones presenten esas características.

La imagen 6.13 muestra dos ejemplos de aplicaciones para servicios basados en localización. Adviértase que estas no tienen necesariamente que guardar simi-

litud con la idea clásica de un SIG, y que pueden no incluir ningún tipo de representación cartográfica. Es decir, que pueden proveer el servicio dando algún tipo de información geográfica (en el caso del ejemplo de la izquierda, se ofrecen mensajes de otros usuarios del servicio localizados en la misma zona) sin necesidad de mostrarla sobre un mapa. En el caso de la captura de pantalla mostrada en el lado derecho, la información sí aparece en un mapa, en el cual se muestran los contactos del usuario que se encuentran cercanos. El servicio en este caso es una forma particular de agenda de contactos que hace énfasis en algunos de ellos en función de su localización y la del usuario.

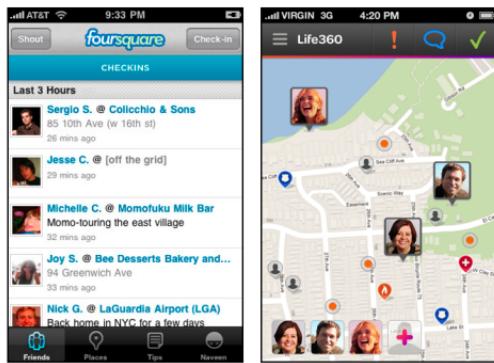


Figura 6.13: Dos servicios basados en localizacion sobre un teléfono móvil. En la parte izquierda, Foursquare [<http://www.foursquare.com>]. En la parte derecha, Life360 [<http://www.life360.com>].

El contexto

Un hecho básico a considerar a la hora de diseñar *software* para un SIG móvil es que en este el *software* conoce dónde se encuentra el usuario, y el trabajo de

dicho usuario normalmente se basa en emplear esa localización para realizar algún tipo de tarea. Aparece así un concepto que carece prácticamente de importancia en un SIG de escritorio que se ejecuta sobre una máquina inmóvil, pero que en el SIG móvil y en cualquier otra aplicación móvil resulta fundamental: el *contexto*.

Entendemos por contexto toda aquella información que puede ser utilizada para caracterizar la situación de una entidad. Una entidad es una persona, lugar o objeto que se considera relevante para la interacción entre el usuario y la aplicación, pudiendo considerarse como entidad también a estos últimos [?].

Los factores implicados en definir un contexto son variados, pero pueden considerarse divididos en cuatro grupos fundamentales [?]:

- Contexto **espacial**. Caracterizado por dónde se encuentra el usuario.
- Contexto **social**. Caracterizado por quién es el usuario.
- Contexto **informacional**. Caracterizado por qué recursos se hallan cerca del usuario.
- Contexto **técnico**. Caracterizado por las características de la red y los dispositivos.

Si atendemos al caso particular de los servicios basados en mapas, [?] propone los tipos de contexto que se detallan a continuación:

- **Usuario**. La identidad del usuario permite considerar aspectos tales como su edad y sexo (las cuales condicionan inevitablemente sus intereses), sus preferencias personales (por ejemplo, el idioma que habla y en el que quiere recibir el servicio) o quienes son su amistades y desea contactar con ellas.

- **Localización.** El elemento de contexto más empleado, puede ser tanto absoluta (expresada mediante una coordenada georeferenciada) o relativa a algún otro elemento que forma a su vez parte del contexto.
- **Tiempo.** Puede considerarse a distintas escalas. Por ejemplo, la hora del día (de interés si se busca un establecimiento para indicar al usuario solo aquellos que estén abiertos en ese momento) o la estación del año (que condiciona las actividades que se pueden realizar, ya que muchas de ellas son estacionales).
- **Orientación.** Para saber hacia dónde se dirige el usuario y conocer, por ejemplo, qué tiene delante a la vista. También para servicios de navegación, para saber si el usuario sigue adecuadamente una ruta propuesta. Si el usuario se mueve, puede conocerse mediante el movimiento, pero en caso de estar parado requiere la presencia de elementos adicionales en el dispositivo.
- **Historial de navegación.** Permite crear un perfil del usuario y saber sus intereses en función de los lugares en los que ha estado.
- **Propósito de uso.** Viene definido por las actividades y objetivos del usuario, así como el papel que ejerce durante la utilización del dispositivo móvil. Los distintos tipos de usuarios tendrán diferentes necesidades en lo que respecta a la información, la presentación (por ejemplo, mapas con una representación más o menos técnica) o los modos de interacción con el dispositivo.
- **Situación cultural y social.** La situación de un usuario en este sentido se caracteriza por la proximidad a otros usuarios, su relación social y sus tareas colaborativas.
- **Entorno físico.** En este apartado se incluyen ele-

mentos como la iluminación existente o el ruido ambiente, que condicionan la interacción con el dispositivo y las capacidades del usuario de operar sobre él.

- **Propiedades del sistema.** Se incluyen aquí los aspectos relativos a la tecnología. Por ejemplo, si el dispositivo es en color o en blanco y negro, si tiene teclado o pantalla táctil, o si la conexión a Internet es continua o intermitente.

Algunos de los anteriores puntos puede pensarse que no guardan una relación directa con los LBS y no han de ser exclusivos de estos. Es decir, que elementos como, por ejemplo, el tiempo, pueden ser tenidos en cuenta a la hora de proveer un servicio sin necesidad de que el dispositivo a través del que se realiza dicho servicio cuente con medios para establecer su posición. Un ordenador de sobremesa, por ejemplo, también dispone de información sobre el tiempo que puede considerarse. Aunque esto es cierto, la inclusión del contexto espacial añade relevancia a los otros elementos del contexto, ya que modifica en gran medida la labor del usuario y la naturaleza de su actividad sobre el dispositivo.

Si recurrimos al clásico ejemplo del cálculo de rutas, aunque el análisis llevado a cabo sea similar y requiera unos datos similares (punto de inicio, punto de destino y red de vías de comunicación), el hecho de que unos de dicho puntos (habitualmente el de salida) sea la coordenada actual del dispositivo modifica en gran medida muchos aspectos de esa operación. Al realizar un cálculo de rutas en un SIG de escritorio sobre un ordenador de sobremesa, lo normal es que este cálculo nos sirva para planificar un viaje futuro o para estimar el tiempo que, en algún momento dado, tardaremos en cubrir la distancia entre dos puntos.

Al contrario que en el caso de usar un dispositivo móvil como un navegador GPS, ese viaje por esa ruta no vamos a realizarlo inmediatamente, no tiene necesariamente que ser un trayecto cercano a nuestra posición actual e incluso no vamos a ser nosotros mismos quienes hagamos el recorrido. De este modo, el contexto temporal o el personal del usuario no tienen significado alguno. Podemos incluir esas variables explícitamente si el *software* así nos lo permite, pero no son una parte inherente al cálculo y que siempre sea tenida en cuenta. Por su parte, en un dispositivo móvil pueden incorporarse todos estos factores asumiendo que, en la mayoría de los casos, sí van a ser de importancia. En resumen, que el hecho de que se trabaje sobre un dispositivo móvil y este permita conocer su posición añade significado a todas las clases de contexto.



Figura 6.14: Dos ejemplos de realidad aumentada (cortesía de 5 Magazine)

El *software* debe diseñarse de forma que pueda responder a ese contexto y adaptarse a él. Las siguientes son las áreas principales en las que esa adaptación puede producirse [?]:

- **Información.** La información proporcionada a un usuario varía en función del contexto en que se en-

cuentre. Por ejemplo una búsqueda de un determinado tipo de comercio puede restringirse a un radio de alcance desde su posición habitual, o bien filtrarse para informar solo de aquellos que ofrezcan algún producto o servicio que sea de interés para el usuario.

- **Tecnología.** Conociendo las características del dispositivo, puede establecerse la mejor forma de ofrecer un servicio. Si, por ejemplo, la pantalla del dispositivo es demasiado reducida, no será interesante hacerlo mediante imágenes de gran tamaño, así como proveer algún tipo de información sonora si el dispositivo no dispone de capacidades para reproducir sonido. Como ya vimos, una de las características del SIG móvil es la variedad de plataformas, por lo que la adaptación en este sentido es importante para poder satisfacer las necesidades de los usuarios con independencia de qué plataforma emplean.
- **Interfaz de usuario.** El servicio puede alterar la interfaz sobre la que opera el usuario. El ejemplo más clásico es el desplazamiento de un mapa a medida que este se mueve.
- **Presentación.** Si la información requiere ser representada, esto puede hacerse de diversas formas en función del contexto. La simbología empleada se adapta, por ejemplo, a las preferencias del usuario (resaltando aquellos elementos que le resultan de mayor interés) o a la hora del día (señalando de algún modo explícito el hecho de que algunos elementos pueden no estar disponibles, tales como comercios si es de madrugada), entre otros factores.

La adaptación a un contexto dado puede ser mayor o menor en función de las propias características del servicio y de cómo este se plantee. En algunos casos puede llegar a ser muy intensa, tal y como sucede en

la denominada *realidad aumentada*, donde la frontera entre la realidad y el dispositivo se difumina gracias a que aquella se «sumerge» en este y es ampliada. En la realidad aumentada, vemos en la pantalla de nuestro dispositivo imágenes del entorno en el que nos encontramos, pero complementadas con elementos adicionales tales como gráficos, vídeos o sonido. Estos elementos es posible incorporarlos gracias a que se conoce con exactitud el contexto, y esa información puede emplearse para buscar nueva información que añadir. La figura 6.14 muestra sendos ejemplos muy ilustrativos de lo anterior.

RESUMEN

Los SIG móviles combinan las tecnologías SIG con los dispositivos móviles, el acceso inalámbrico a Internet y los sistemas de posicionamiento, para ofrecer una solución ventajosa para el desarrollo de trabajo de campo. De particular interés son los denominados Servicios Basados en Localización, donde un tercero ofrece servicios que dependen de la posición en cada momento del dispositivo. Otras de las tareas fundamentales del SIG móvil son la navegación o la captura de datos espaciales directamente en el dispositivo, las cuales son las principales en lo que hemos denominado SIG «en campo».

Para comprender el funcionamiento de las tecnologías implicadas en el SIG móvil, hemos analizando por separado los métodos de posicionamiento, las redes inalámbricas y las aplicaciones de *software*, cada una de las cuales desempeña un papel básico en definir las capacidades de un sistema SIG móvil.

BASES DE DATOS

Las bases de datos son un elemento fundamental en el entorno informático hoy en día y tienen aplicación en la práctica totalidad de campos. Concebidas con un propósito general, son de utilidad para toda disciplina o área de aplicación en la que exista una necesidad de gestionar datos, tanto más cuanto más voluminosos sean estos. En el ámbito particular de los SIG, los datos son cada día más voluminosos, debido no solo a una mayor cantidad de información, sino también a una mayor precisión en esta, la cual implica un mayor volumen de datos. Además, presentan otra serie de características (uso múltiple, necesidad de acceso eficiente para análisis, necesidad de indexación, etc.), haciendo todas ellas que sea recomendable el uso de bases de datos y tecnologías específicas para su manejo.

Entendemos como *Base de Datos* un **conjunto de datos estructurado y almacenado de forma sistemática** con objeto de facilitar su posterior utilización. Los elementos clave de la base de datos son esa estructuración y sistematicidad, pues ambas son las responsables de las características que hacen de la base de datos un enfoque superior a la hora de gestionar

datos.

Las ventajas de utilizar una base de datos frente a una gestión no organizada de estos las encontramos tanto en los propios datos como en el uso que se hace de ellos. Algunas ventajas que afectan directamente a los datos son las siguientes:

- **Mayor independencia.** Los datos son independientes de las aplicaciones que los usan, así como de los usuarios.
- **Mayor disponibilidad.** Se facilita el acceso a los datos desde contextos, aplicaciones y medios distintos, haciéndolos útiles para un mayor número de usuarios.
- **Mayor seguridad (protección de los datos).** Mayor facilidad de replicación de datos y mejor sincronización.
- **Menor redundancia.** Con el consiguiente menor volumen de datos y mayor rapidez de acceso.
- **Mayor eficiencia en la captura, codificación y entrada de datos.**

Esto tiene una consecuencia directa sobre los resultados que se obtienen de la explotación de la base de datos, presentándose al respecto ventajas como, por ejemplo:

- **Mayor coherencia.** La mayor calidad de los datos que se deriva de su mejor gestión deriva en mayor calidad de los resultados.
- **Mayor eficiencia.** Facilitando el acceso a los datos y haciendo más sencilla su explotación, la obtención de resultados es más eficiente.
- **Mayor valor informativo.** Resulta más sencillo extraer la información que los datos contienen, ya que

uno de los cometidos de la base de datos es aumentar el valor de estos como fuente de información.

Por último, los usuarios de la base de datos también obtienen ventajas al trabajar con estas, entre los que cabe citar:

- **Mayor facilidad y sencillez de acceso.** El usuario de la base de datos se debe preocupar únicamente de *usar* los datos, disponiendo para ello de las herramientas adecuadas y de una estructura sólida sobre la que apoyarse.
- **Facilidad para reutilización de datos.** Esto es, facilidad para compartir.

De forma resumida, puede decirse que la principal bondad de una base de datos es la **centralización** que supone de todos los datos con los que se trabaja en un contexto determinado, con las consecuencias que ello tiene para una mejor gestión, acceso o estructuración de estos.

BASES DE DATOS RELACIONALES

De entre los distintos modelos existentes para plantear una base de datos, el más habitual, tanto dentro como fuera del ámbito de los SIG, es de las denominadas **bases de datos relacionales**. Este modelo utiliza un esquema basado en **tablas**, que resulta a la vez sencillo de comprender y fácil de utilizar para el análisis y la consulta de los datos. Las tablas contienen un número dado de **registros** (equivalentes a las filas en la tabla), así como **campos** (columnas),

La tabla en sí se conoce como **relación**, ya que recoge la relación existente entre sus elementos, y constituye

así el eje central del modelo relacional. Las columnas representan los distintos **atributos** asociados a la entidad, mientras que las filas conforman los distintos **registros**. Una fila se forma con un conjunto de n atributos, constituyendo una **tupla**.

Una base de datos contiene normalmente más de una tabla, ya que suelen ser muchos los tipos de datos a almacenar y resulta conveniente dividirlos en distintas tablas. Además de las relaciones que la tabla en sí implica, es necesario definir interrelaciones entre las distintas tablas, y para ello se emplean los denominados atributos **clave**. Un atributo clave es aquel que tiene valor **único** e **invariable** para cada tupla, pudiendo servir para representar a esta plenamente. Por ejemplo, en una tabla con nombres de personas e información adicional sobre ellas, el número de su DNI puede servir como atributo clave.

Cuando trabajamos con datos espaciales, es habitual emplear la **componente espacial como clave**, ya que esta suele ser única.

Las interrelaciones entre tablas pueden ser de distintos tipos, según el número de entidades de una tabla con los que se relacionen las entidades de la otra. Tenemos así relaciones de **uno a muchos**, de **uno a uno** o de **muchos a muchos**. Por ejemplo, en una tabla con entidades que representan personas y otra con entidades que representan ciudades, si establecemos una interrelación *vive en*, se tratará de una interrelación de uno a muchos, ya que en una ciudad pueden habitar varias personas.

SISTEMAS GESTORES DE BASES DE DATOS

Junto con las bases de datos, el elemento fundamental para el aprovechamiento de estas son los **Sistemas Gestores de Bases de Datos** (SGDB o DBMS, del inglés *DataBase Management System*). Estos sistemas representan un **elemento intermedio entre los propios datos y los programas** que van a hacer uso de ellos, facilitando las operaciones a realizar sobre aquellos. Los programas tales como un SIG no acceden directamente a la base de datos, sino que lo hacen **a través de un SGBD**.

Algunas características que ha de tener un SGDB son las siguientes:

- **Acceso transparente a los datos.** El SGBD debe crear una abstracción de los datos que haga el trabajo con estos más sencillo, ocultando aspectos internos que no sean relevantes para dicho trabajo. Procedimientos como las **consultas**, que veremos en la sección 7, se realizan a través del SGBD, que es quien se encarga de interpretar dichas consultas, aplicarlas sobre la base de datos y devolver el resultado correspondiente. El SIG no accede a los datos, sino que se comunica con el SGBD y deja en manos de este el proceso de consulta en sí.
- **Protección de los datos.** Si la base de datos almacena información sensible, el SGBD debe **controlar el acceso** a esta, restringiendo el acceso cuando corresponda (por ejemplo, estableciendo distintos permisos de acceso para distintos tipos de usuarios) e implementando los mecanismos de protección necesarios.
- **Eficiencia.** El SGBD debe ser capaz de gestionar de forma fluida **grandes volúmenes de datos o**

de operaciones (por ejemplo, muchos usuarios accediendo simultáneamente), de modo que dé una respuesta rápida a las peticiones de los usuarios de la base de datos.

- **Gestión de transacciones.** Las operaciones sobre la base de datos tales como la adición o borrado de un registro se realizan mediante transacciones. El SGBD ha de encargarse de gestionarlas de manera eficiente y segura para que todos los usuarios de la base de datos puedan hacer su trabajo de forma transparente. Se denomina **transaccional** al SGBD capaz de garantizar la integridad de los datos, no permitiendo que las transacciones puedan quedar en un estado intermedio.

En este sentido, resulta de especial importancia la existencia de **lenguajes de consulta**, que son los que una aplicación utilizará para comunicarse con el SGBD y expresar las operaciones que desea realizar con los datos de la base de datos. El lenguaje de consulta mas extendido es **SQL** (Standard Query Language)

Bases de datos espaciales

Todo cuanto hemos visto en los puntos anteriores constituye el conjunto de ideas fundamentales sobre las que se asienta la creación y uso de bases de datos de cualquier índole. La inclusión de datos espaciales en este esquema no es en absoluto obvia, y presenta una complejidad adicional que requiere de nuevos planteamientos. Para que una base de datos pueda considerarse espacial, debe adaptarse y añadir elementos adicionales.

En primer lugar, el dato espacial debe poder **almacenarse de forma nativa** en la base de datos. Esto

quiere decir que una geometría debe poder almacenarse asociada a una entidad en una tabla, del mismo modo que sucede con otros tipos de datos tales como valores numéricos o cadenas de texto. El dato no solo debe poder almacenarse, sino tambien **entenderse** por parte del SGBD, para así comprender la naturaleza su naturaleza espacial y poder responder a peticiones relativas a esta por parte del usuario. Esto se denomina **almacenamiento transparente**, frente al almacenamiento **opaco**, en el cual la base de datos es capaz de recoger cualquier tipo de valor, pero sin ser capaz de entender su naturaleza y utilizarlo.

Aunque existen planteamientos para almacenar datos raster en bases de datos, en general **las bases de datos espaciales trabajan con datos vectoriales** y están mejor adaptadas a estos. Las geometrías del dato vectorial se incluyen, como ya se ha dicho, dentro de los valores de un registro de la tabla (que se corresponde con una entidad en el modelo de datos vectoriales). Por su parte, la componente temática del dato espacial puede almacenarse sin problema en la base de datos, sin necesidad de ningún tipo de adaptación.

Cuando la base de datos está preparada para almacenar y trabajar con los datos espaciales, es necesario **adaptar el lenguaje de consulta**. A las operaciones habituales que un SGBD es capaz de realizar en función de los datos, se añaden otras que utilizan las propiedades espaciales del dato espacial. Se tiene así un **lenguaje de consulta espacial**, que permite consultas con componente espacial.

CONSULTAS

Entendemos por consulta una operación en la cual *preguntamos* a los datos geográficos algún tipo de cuestión simple, generalmente basada en conceptos formales sencillos. Este tipo de análisis, aunque no implica el uso de conceptos analíticos complejos, es uno de los elementos clave de los SIG, pues es parte básica del empleo diario de estos.

Aunque las consultas no son algo exclusivo de las bases de datos, es mediante el concurso de estas que adquieren toda su potencia y permite efectuar gran parte de las operaciones habituales de un SIG.

En el contexto espacial, una consulta representa un uso similar al que damos a un mapa clásico, cuando en base a este respondemos a preguntas como *¿qué hay en la localización X?* o *¿qué ríos pasan por la provincia Y?* No obstante, no debemos olvidar que los datos espaciales tienen dos componentes: una espacial y otra temática. Preguntas como las anteriores hacen referencia a la componente espacial, pero igualmente pueden efectuarse consultas que se apliquen sobre la parte temática. Y más aún, pueden efectuarse consultas conjuntas que interroguen a los datos geográficos acerca de los atributos espaciales y temáticos que estos contienen.

Un ejemplo muy sencillo de consulta es lo que conocemos en un SIG como **selección**. De todos los registros de la tabla de datos, aquellos que cumplen el criterio indicado se marcan como seleccionados, y posteriormente pueden utilizarse únicamente estos como base de otro análisis, o simplemente el usuario puede ver cuáles han sido los seleccionados para así obtener la respuesta a su consulta. La figura 7.1 muestra un ejem-

plo típico de esto, en el que el usuario define un área rectangular y se seleccionan las entidades que cumplen la condición de intersecar con él. Los criterios de selección pueden ser sencillos como este, o más elaborados y complejos.

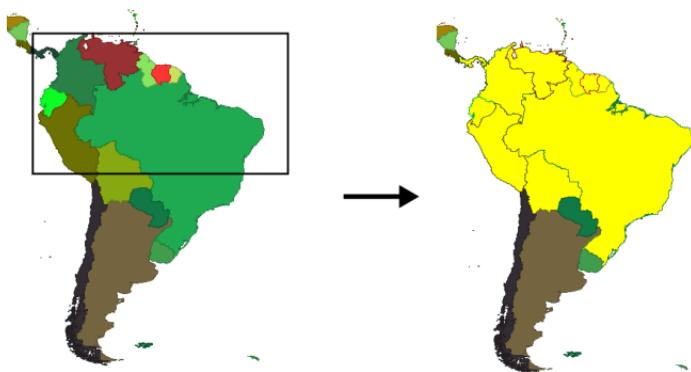


Figura 7.1: Una consulta sencilla mediante la definición gráfica de un rectángulo. Todas las entidades dentro de este son el resultado de la consulta y quedan seleccionadas en el SIG.

Una consulta nos vale también para extraer información de una base de datos de acuerdo a nuestras necesidades, y para crear posteriormente y a partir de dicha información una nueva capa. Esta operación es útil cuando la base de datos de la que disponemos es muy voluminosa y solo resulta de interés para nuestro trabajo una parte de ella. Puede tratarse de una parte en el sentido espacial (la base de datos contiene datos a nivel mundial y se quiere trabajar a nivel estatal), en el sentido temático (la base de datos contiene mucha información de cada entidad y solo interesan algunos campos), o en una combinación de ambas. Para extraer

dicha parte y trabajar únicamente con ella, utilizaremos una consulta.

Veamos algunos ejemplos de consultas. Sea una capa con los distintos países del mundo y una serie de valores económicos y sociales asociados a cada uno de ellos. Consideremos las siguientes preguntas:

- ¿Qué países tienen un Producto Interior Bruto mayor que el de España?
- ¿Qué países han experimentado un crecimiento económico en el último año?
- ¿Cuántos países tienen más de 200 millones de habitantes?

En todos estos casos estamos haciendo referencia a países, los cuales, como sabemos, estarán asociados a elementos geométricos que definen sus propiedades espaciales, es decir, a una componente espacial. Esta componente es la que permite que, además de poder plantear las consultas anteriores, podamos representar cada país en la pantalla y visualizarlo, o saber cuáles de ellos se encuentran en el hemisferio norte (esta sería una consulta espacial, de las que más adelante en este mismo capítulo veremos).

Sin embargo, cuando realizamos consultas como las tres anteriores, no acudimos para nada a la componente espacial. Consultas como estas podrían resolverse si en lugar de una capa dentro de un SIG tuviéramos, por ejemplo, un simple anuario estadístico lleno de tablas con datos correspondientes a cada país.

Las consultas pueden incluir varios criterios en una sola pregunta. Por ejemplo:

- ¿Qué países de la zona euro tienen más de 40 millones de habitantes?

- ¿En qué países de habla inglesa aumentó la población durante el último año?

Para expresar esas consultas se han de incluir elementos de la denominada **lógica booleana**¹. Esta implica el uso de **operadores lógicos**, mediante los cuales se reescribirían las consultas anteriores de la siguiente manera:

- ¿Qué países tienen como moneda el euro *y* a la vez tienen más de 40 millones de habitantes?
- ¿Que países hablan inglés *y* sufrieron un aumento de población durante el último año?

Los lenguajes de consulta que se emplean para transmitir estas operaciones a un SGBD, permiten el uso de tales operadores para formular consultas.

Si el SGBD es de tipo espacial y *entiende* que algunas de las columnas de una tabla contiene información espacial (es decir, que cada entidad no solo tiene información temática), pueden plantearse consultas que hacen uso de esta, tales como las siguientes.

- ¿Qué países comparten frontera con Alemania?
- ¿Cuántos países se encuentran completamente en el hemisferio sur?
- ¿Qué países están a menos de 2000 km de España?

Para dar respuesta a esas cuestiones, basta analizar la componente espacial y no necesitamos para nada los datos con los que hemos trabajado anteriormente. Son consultas puramente espaciales. Aunque estas consultas amplían lo que ya conocemos, en realidad no abren

¹Denominada así por el matemático irlandés George Boole(1815, 1864)

ninguna nueva vía de estudio de los datos geográficos. Son consultas a las que podríamos responder utilizando un mero mapa impreso, sin aprovechar el hecho de que dentro de un SIG las componentes espacial y temática se hallan íntimamente vinculadas. La verdadera potencia de las consultas espaciales la encontramos en la combinación de estas consultas sobre la componente espacial y las que vimos anteriormente sobre la componente temática. Así, se pueden plantear, por ejemplo, cuestiones como:

- ¿Qué países del hemisferio norte tiene una densidad de población mayor que la de Perú?
- ¿Cuántos países con más de 10 millones de habitantes se encuentran a menos de 1000 km de la frontera de Rusia?

Estas consultas incorporan elementos que hacen necesario acudir a la tabla de atributos, y otros que requieren analizar la componente espacial, estudiando las relaciones espaciales y topológicas de las geometrías asociadas.

Las consultas pueden incluir **varias capas**. Por ejemplo, si además de la capa de países disponemos de una capa de ríos del mundo, podríamos responder a la pregunta *¿qué países atraviesa el Nilo?*

Igualmente, las uniones entre tablas que hemos visto para el caso de la componente temática pueden establecerse mediante un criterio espacial. Se tiene así una **unión espacial**.

Un ejemplo muy sencillo de unión espacial es el que encontramos si combinamos la capa de países del mundo que venimos utilizando con una capa de ciudades del mundo. Podemos unir a la tabla de esta segunda capa

todos los valores que caracterizan al país al que pertenece cada ciudad. Si existe un campo común entre ambas tablas de atributos (por ejemplo, el nombre del país), esto serviría para efectuar esta unión. No obstante, esto no es necesario, ya que existe otro elemento común que no se encuentra almacenado dentro de la tabla, pero que puede tomarse de la componente espacial: toda ciudad debe estar situada dentro de los límites del país al que pertenece. Esto sirve para establecer la relación entre las tablas, y cada ciudad debe relacionarse con aquella entidad dentro de cuya geometría se encuentre el punto que la representa.

Índices espaciales

Si realizamos una consulta a una base de datos, el resultado es un subconjunto de esta con los elementos que cumplen el criterio expresado en la consulta. Si se implementa de forma *directa* dicha consulta, esta operación implica comprobar todos los elementos de la base de datos y ver cuáles son los que cumplen con el citado criterio. Teniendo en cuenta que una base de datos puede tener un gran tamaño, esta forma de proceder no es la óptima.

Los índices nos permiten *alcanzar* los elementos que constituyen la respuesta a nuestra consulta, haciéndolo de la forma más rápida y llegando hasta ellos sin tener que pasar por todos los restantes.

Un ejemplo fácil de entender es el de una guía telefónica en la que los nombre están ordenados alfabéticamente. Gracias a ese orden y a que se conoce el alfabeto, se puede buscar rápidamente un nombre sin necesidad de leer todos ellos.

Al utilizar una base de datos, si no disponemos de

un índice deberemos recorrer toda ella para dar respuesta a nuestras consultas. No sabemos *dónde* buscar las respuestas a nuestras consultas, del mismo modo que si en una guía telefónica no supiéramos que carece de sentido buscar en la letra F el número telefónico del señor Pérez.

Ademas de índices para datos de tipo numérico o texto, en los que resulta obvio establecer un orden natural, en el ámbito de los SIG tienen importancia los denominados **índices espaciales**. Aunque sus fundamentos teóricos son distintos, el concepto es similar al de índices de bases de datos no espaciales: elementos que permiten **optimizar las consultas mediante una correcta estructuración** de los datos, en particular en este caso de su componente espacial.

Puede entenderse la idea de un índice espacial mediante un sencillo ejemplo de cómo empleamos ideas parecidas a los índices espaciales de forma natural cuando tratamos de resolver una consulta espacial sin la ayuda de un SIG. Supongamos que tenemos nuestro mapa de países del mundo y queremos averiguar qué países tienen su frontera a menos de 3000 kilómetros de la frontera de España. ¿Cómo operaríamos de manera natural para dar respuesta a esta consulta?

La solución más inmediata es medir la distancia entre España y todos los países restantes, y después tomar aquellos que hayan arrojado un resultado de distancia menor a 3000. La operación daría el resultado esperado, pero implicaría un gran número de mediciones, y no sería una forma óptima de operar. Más probable es que no efectuemos mediciones con los países de América, pues un conocimiento básico de geografía basta para saber que todos ellos se encuentran a más de 3000 kilómetros. No sabemos exactamente a qué distancia

se encuentran, pero sabemos que no van a cumplir el criterio establecido en la consulta.

Ese conocimiento básico de geografía que tenemos es en realidad una especie de índice espacial. No sirve para saber las distancias exactas ni resolver la consulta por completo, pero sirve para **dar una aproximación y facilitar el trabajo**. Descartamos un buen numero de países de forma casi inmediata, y luego solo realizamos las operaciones costosas (la medición) con un subconjunto del total.

De modo similar, los índices espaciales nos permiten obtener resultados en un área concreta sin necesidad de analizar todo el espacio ocupado por el total de los datos. Gracias a ello, hacen las consultas mas efectivas y permiten trabajar con grandes volúmenes de datos.

Los índices espaciales se almacenan junto con los datos a los que hacen referencia, bien en ficheros adicionales o dentro de la propia base de datos, en case de utilizarse una. Los SGBD espaciales tienen **capacidades para calcular estos índices espaciales** y almacenarlos en la base de datos, recurriendo a ellos cuando se realiza una consulta que requiera su uso.

ANÁLISIS ESPACIAL. FUNDAMENTOS

El análisis espacial es una de las tareas fundamentales sin las cuales el concepto de SIG no alcanza su verdadero significado.

El análisis espacial es el **estudio cuantitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio**. Ello indica una importancia clave de la posición, la superficie, la distancia y la interacción a través del propio espacio.

Ejemplos de análisis que realizamos con cartografía fuera de un SIG son el buscar en un mapa dónde se sitúa el pico más alto, ver la elevación concreta a la que se encuentra un elemento dado tal como una población, o planificar una jornada turística viendo qué lugares de interés podemos visitar o cómo llegar desde uno a otro de estos lugares haciéndolo por las mejores carreteras o de la forma más rápida. Estas actividades habituales son ejemplos de análisis geográficos que podemos igualmente realizar dentro de un SIG.

Mediante el análisis podemos generar nuevos datos que pueden ser **nuevas capas de datos geográficos, tablas de datos, valores escalares o vectores**.

En ocasiones, los resultados expresan **la misma**

variable que el dato de partida (por ejemplo, el cálculo de una media), y en otros las variables de entrada y salida son **distintas** (por ejemplo, si a partir de una capa de elevaciones calculamos una de pendientes).

Asimismo, todo análisis espacial parte de un conjunto de datos espaciales, pudiendo estos ser **de un único tipo, o de varios distintos** que se combinan en un procedimiento concreto. Por ejemplo, en el caso de calcular la localización del punto más alto, el resultado es una sencilla coordenada, y tan solo se utiliza la variable elevación. En el caso de la altura media de una ciudad, se utilizan dos entradas: por un lado, la elevación, y por otro, el emplazamiento de la ciudad. Aunque un mapa clásico contiene toda esa información en una única hoja, en realidad son dos elementos distintos combinados a la hora de representarlos. En términos más acordes con un SIG, podemos decir que tenemos dos capas distintas que utilizamos como entradas.

El análisis dentro un SIG nos permite tanto formular como responder a cuestiones. Estas cuestiones pueden ser:

- Relativas a posición y extensión
- Relativas a la forma y distribución
- Relativas a la asociación espacial
- Relativas a la interacción espacial
- Relativas a la variación espacial

Algunos ejemplos de análisis geográfico son los siguientes.

- **Consulta espacial.** Vimos las consultas en detalle dentro del capítulo dedicado a las bases de datos.
- **Análisis topológico.** Pueden plantearse consultas referidas no solo a la posición de los elementos geográficos, sino a la **relación con otros elementos**.

La existencia de topología puede emplearse para la realización de consultas que respondan a cuestiones como:

¿Cómo llegar desde mi posición actual hasta una coordenada concreta por la red viaria existente?

¿Qué comunidades autónomas comparten límite con Madrid?

- **Medición.** La existencia de una referencia espacial para cada uno de los elementos con los que trabajamos en el análisis dentro de un SIG hace que podamos **cuantificar** otra serie de parámetros también espaciales. Entre las mediciones más básicas, encontramos las distancias, áreas, perímetros o factores de forma. Mas elaboradas, encontramos otras como pendientes o indices derivados de medidas simples.
- **Combinación.** Uno de los procedimientos más habituales y más característicos dentro del uso de un SIG es la **combinación o superposición** de varias capas de información. La propia estructura de la información geográfica en capas facilita notablemente estos procedimientos y convierte a los SIG en plataformas ideales para llevar a cabo análisis donde se combina información sobre diversas variables.
- **Transformaciones.** Podemos englobar dentro de este grupo una amplia serie de procedimientos que modifican los elementos de entrada de diversas formas. Entre los más habituales, encontramos la **transformación de coordenadas**, la **simplificación de geometrías**, o la **creación de áreas de influencia** o la **reclasificación de valores**. Estas transformación pueden afectar tanto a la componente espacial como a la componente temática del dato.
- **Análisis de superficies.** El análisis de superficies es uno de los más potentes de cuantos encontra-

mos en un SIG. Desde parámetros básicos como la **pendiente** o la **orientación** hasta parámetros morfométricos muy específicos, pasando por todas las herramientas del **análisis hidrológico**, la batería de operaciones disponibles es muy amplia.

- **Estadística descriptiva.** Los elementos de la estadística clásica tienen sus equivalentes en los datos espaciales, y nos permiten **calificar cuantitativamente** los datos con los que trabajamos. Se incluyen aquí descriptores de centralidad y dispersión, de dependencia espacial o el estudio de patrones espaciales, entre otros muchos. Estos pueden a su vez usarse para el contraste de hipótesis que contengan una cierta componente espacial.

Por ejemplo, estos estadísticos nos permiten dar respuesta a cuestiones del tipo

¿Es constante la media de altura a lo largo de toda la geografía de mi país?

¿Existe alguna dirección predominante en los movimientos de individuos de una especie o se desplazan erráticamente?

- **Inferencia.** Otro análisis estadístico de gran importancia en los SIG es el que permite inferir comportamientos de las distintas variables y estudiar, por ejemplo, la forma en que estas van a evolucionar a lo largo del tiempo.

El establecimiento de modelos de cambio y variación representa una de las herramientas más actuales en el campo de los SIG, y un campo en abundante desarrollo.

- **Toma de decisiones y optimización.** La estructura de la información geográfica en capas dentro de un SIG, favorable como ya vimos para la superposición de capas, lo es igualmente para estudiar de

forma combinada los efectos de distintos factores. Este estudio nos permite luego responder a cuestiones como, por ejemplo,

¿Cuál es el mejor lugar para emplazar una nueva construcción en función de su impacto sobre el medio?

¿Dónde situar un nuevo hospital para que el servicio en la comarca mejore lo máximo posible?

- **Modelización.** La creación de modelos espaciales dentro de un SIG es una tarea aún pendiente de mucho desarrollo. No obstante, existe un gran número de modelos en los más diversos campos, y la arquitectura de datos y procesos de los SIG es propicia para la implementación de otros nuevos.

PARTICULARIDADES DE LOS DATOS ESPACIALES PARA SU ANÁLISIS

Las características propias de los datos espaciales dotan a estos de una **gran potencialidad** de análisis, al tiempo que **condicionan o limitan** otras operaciones. Algunas de estas características representan problemas que han de tenerse presentes en el análisis; otros son simplemente conceptos básicos que deben conocerse pero no han de implicar necesariamente una dificultad asociada.

Escala

A la hora de estudiar la información geográfica, podemos hacerlo a **distintos niveles** y, dependiendo del nivel elegido, los resultados serán de una u otra naturaleza. Debido a esto, además de considerar la escala cartográfica para la representación y gestión de

datos en un SIG, es necesario considerar la **escala de análisis**.

La escala de análisis depende **del dato en sí** (precisión, tipo, etc.), así como del **análisis que se va a realizar** con él.

Como se muestra en la figura 8.1, si para definir las formas de relieve en un punto dado lo hacemos considerando dicho punto y los valores de elevación a su alrededor, la caracterización que hagamos varía en función de la dimensión de esa zona alrededor (que es la que define la escala de análisis). Para valores pequeños de dicha zona de análisis, el punto analizado puede definirse como una cima, mientras que aumentando la escala de análisis se advierte que el punto se sitúa en el fondo de un valle.

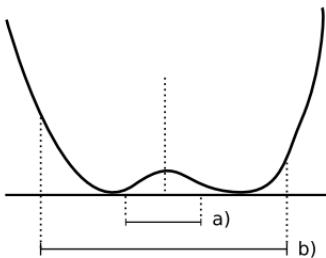


Figura 8.1: Dependiendo de la escala de análisis, un mismo relieve puede ser caracterizado como cima (a) o fondo de valle (b)

Por tanto, debemos observar el relieve desde la distancia correcta a la cual la información que nos proporciona es la más adecuada para un análisis dado. Además de existir una escala de mayor relevancia para un análisis concreto, es de interés el trabajar a **múltiples escalas** y combinar los resultados.

Otro ejemplo de cómo la escala de análisis condi-

ciona los resultados obtenidos lo encontramos en el caso de efectuar **mediciones**. Como puede verse en la figura 8.2, la unidad de medida empleada provoca que se obtengan resultados distintos.

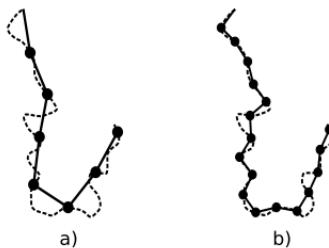


Figura 8.2: La unidad de medida empleada modifica el resultado obtenido.

La unión del valor resultante con la escala a la que se ha obtenido tiene en conjunto pleno significado, pero ese valor por sí mismo carece de dicho significado.

El concepto de **fractal** tiene una implicación directa en este hecho.

El propio **formato de almacenamiento** condiciona el efecto de la escala, ya que puede imponer límites. Tal es el caso cuando se trabaja con capas raster, en las que el **tamaño de celda** delimita la precisión que puede obtenerse en el análisis.

El Problema de la Unidad de Área Modificable

Muchas de las variables con las que trabajamos dentro de un SIG **no pueden medirse de forma puntual**, y por ello han de **estudiarse para un área dada**. Ejemplos de este tipo de variables son el porcentaje de población en un rango de edad determinado o la densidad media de población.

Las áreas que se definen para poder trabajar con

las variables de esta índole son **esencialmente arbitrarias**, tales como países, regiones o distritos, que se establece sin ningún criterio propio del análisis espacial. La utilización de una u otra unidad **altera los resultados** extraídos de las variables estudiadas.

Este problema, por tener relación con la elección de la unidad de agregación de la información, se conoce como *Problema de la Unidad de Área Modificable*(PUAM).

Un problema particular relacionado con el PUAM es la denominada **falacia ecológica**, que consiste en asumir que los valores calculados para una unidad de área pueden aplicarse a los individuos de la población existente en dicha área. Sólo en el caso de que exista una completa homogeneidad para la variable analizada, lo cual raramente sucede, la anterior suposición sería cierta.

Autocorrelación espacial

Se denomina **autocorrelación espacial** a la existencia de una **correlación de la variable consigo misma**, de tal modo que los valores de esta variable en un punto guardan relación directa con los de esa misma variable en otros puntos cercanos. Por ejemplo, en el caso de medirse la temperatura, los puntos cerca de un foco de calor tendrán una temperatura mayor que aquellos cerca de focos fríos. Si estudiamos la distribución de una enfermedad infecciosa, es más probable que los casos se encuentren agrupados, de forma que la presencia de un alto número de casos implique también una alta incidencia en poblaciones cercanas.

Otra forma de expresar la autocorrelación espacial es mediante la conocida como **Primera Ley Geográfica**.

fica de Tobler, que establece que «todo está relacionado con todo, pero las cosas próximas entre sí están más relacionadas que las distantes».

La autocorrelación espacial, tal y como se ha descrito antes, es **positiva**. Puede, no obstante, existir una *autocorrelación espacial negativa*, si los valores altos se rodean de valores bajos y viceversa.

En caso de no existir ningún tipo de autocorrelación espacial, se tiene que los datos recogidos en una serie de puntos son **independientes entre sí** y no se afectan mutuamente, sin que tenga influencia de la distancia.

La figura 8.3 muestra unas sencillas capas ráster en las que se presentan los tres tipos de autocorrelación espacial anteriores.

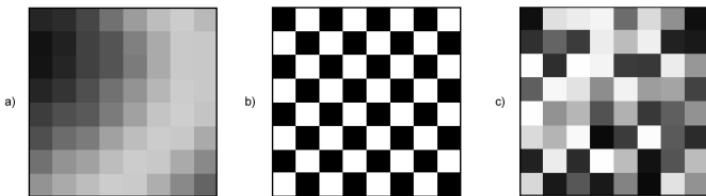


Figura 8.3: a) Autocorrelación espacial positiva. b) Autocorrelación espacial negativa. c) Ausencia de autocorrelación espacial (independencia)

Las consecuencias de la existencia de autocorrelación espacial son numerosas y de gran importancia.

Por una parte, muchos de los análisis estadísticos suponen la **independencia de la variable**. Puesto que existe una dependencia de la componente espacial, será necesario para obtener resultados correctos introducir dicha componente espacial como una variable más.

Algo similar sucede cuando los datos presentan alguna **tendencia espacial** (los valores de una variable

están relacionados con sus propias coordenadas geográficas), ya que esto tambien invalida el supuesto de la independencia de los datos.

Existiendo autocorrelación espacial, y siendo esta positiva, la **inferencia estadística es menos eficaz** que si se cuenta con un número igual de observaciones de una variable independiente.

La autocorrelación espacial no es, no obstante, un elemento que siempre tenga consecuencias negativas. Puesto que los puntos cercanos a uno dado guardan relación con este, la autocorrelación puede aprovecharse para **estimar valores** en un punto cualquiera si conocemos los valores en puntos cercanos. Este es el fundamento de los **métodos de interpolación**

Existencia de estructura

Tanto la disposición de los datos como las propiedades de la variable estudiada (por ejemplo, la propia autocorrelación espacial como propiedad intrínseca) exhiben una estructura determinada. Esta estructura puede condicionar los resultados del análisis y tener influencia sobre estos.

Los dos principales conceptos estadísticos que definen la estructura espacial de los datos son la **estacionaridad** y la **isotropía**. La estacionaridad indica que el proceso es **invariante a la traslación**. Es decir, que las propiedades son constantes en el espacio y no existe tendencia alguna. La isotropía indica que el proceso es **invariante a la rotación** y tiene lugar del mismo modo en todas direcciones.

Efectos de borde

Las zonas que estudiamos dentro de todo análisis espacial **tienen unos límites establecidos**. Estos límites vienen definidos de forma artificial —el límite de la fotografía aérea de la que disponemos, por ejemplo— o bien de forma natural —si estudiamos un bosque junto a un pantano, el bosque encuentra su límite al borde de este último—. La presencia de estos bordes **distorsiona el resultado de los análisis**, en especial para aquellos parámetros no puntuales que requieren la definición de un área de estudio (densidades, etc., como ya vimos para el caso del PUAM)

La figura 8.4 muestra un ejemplo de efecto de borde.

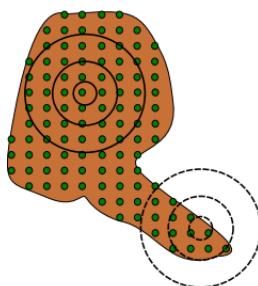


Figura 8.4: Representación del efecto borde y cómo este afecta en mayor o menor medida en función de la escala de análisis. Las zonas en trazo continuo no se ven afectadas. Las zonas en trazo punteado están afectadas de efecto de borde en diferente grado.

En algunos casos, el efecto de borde no se manifiesta únicamente para puntos cercanos a dicho borde, sino para **todos aquellos relacionados o conectados** con él según un determinado criterio, con independencia de su distancia a este.

VISUALIZACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE DATOS ESPACIALES

Visualizar la información geográfica es una parte fundamental del trabajo con un SIG. Aunque algunos datos incluyen su propia manera de representarse —por ejemplo, las imágenes de satélite, las ortofotos, o las obtenidas de un servicio de mapas—, en el SIG es en general el usuario quien define la forma de representar el dato. Es decir, el usuario de SIG toma el papel del cartógrafo, y por tanto debe conocer los fundamentos que este utiliza para la creación de mapas.

Además de las herramientas y conceptos cartográficos clásicos, los SIG incorporan elementos de la denominada **visualización científica**, tales como la interactividad o la representación de datos multidimensionales. El resultado de este nuevo planteamiento, más rico que el de la cartografía clásica, se conoce como **geovisualización**. La diferencia entre la geovisualización y la cartografía clásica puede visualizarse mediante el denominado *Cubo cartográfico* (Figura 9.1).

El cubo cartográfico contiene tres ejes, en los cuales se representan el grado de interactividad, el objetivo principal de la representación y la audiencia a la que

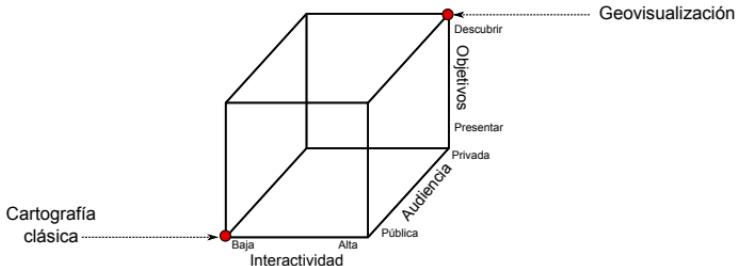


Figura 9.1: El *cubo cartográfico*.

esta se dirige. La cartografía clásica y la geovisualización se sitúan en vértices opuestos, ya que presentan características distintas en estos tres conceptos. El mapa clásico esta pensado para presentar una información de la que ya se dispone, pero no es una herramienta para descubrir nueva información. La geovisualización, por el contrario, con la posibilidad que ofrece al usuario de «explorar» los datos, puede servir para extraer información que no se conocía de antemano a la hora de crear la representación. La interactividad es alta en la geovisualización y baja en el mapa clásico, como ya hemos visto. Por último, la audiencia en la geovisualización es privada, entendiéndose con esto no que existan restricciones para su acceso, sino que en su mayoría son representaciones fugaces que cambian según el usuario interactúa con el *software*, y por tanto lo normal es que solo sea ese usuario quien las disfrute, no teniendo un carácter persistente como el mapa impreso.

En este capítulo veremos las ideas fundamentales sobre la representación de datos, tanto las empleadas en la cartografía tradicional como aquellas propias del ámbito de la geovisualización.

CONCEPTOS BÁSICOS DE VISUALIZACIÓN

Cuando visualizamos cualquier tipo de información geográfica, ya sea a través de un mapa clásico o de algún elemento gráfico en la pantalla de un ordenador, estamos utilizando un **lenguaje visual** para transmitirla. Del mismo modo que al hablar empleamos un lenguaje oral y al escribir un lenguaje escrito, siempre que plasmemos la información geográfica en una serie de elementos visuales estaremos empleando este lenguaje visual.

El estudio de los signos de un lenguaje constituye lo que se conoce como **semiología**. En el caso de los elementos del lenguaje visual, encontramos una **semiología gráfica**. Esta semiología trata los signos del lenguaje visual y la gramática de estos, definiendo una lingüística visual que nos ayuda a comprender cómo una representación gráfica dada cumple su propósito de transmitir la información en base a la cual se crea.

Las variables visuales

Existen diversas propiedades de los elementos visuales que podemos emplear para trasnmitir una información, siendo más adecuadas unas u otras según sea la circunstancia.

Estas propiedades conforman lo que se conoce como *variables visuales*, y se aplican a los elementos básicos de la representación, que son aquellos objetos geométricos de que se compone esta. Las variables visuales permiten diferenciar unos de otros y asignarles unas ciertas características, susceptibles a su vez de ser interpretadas junto al propio significado que el objeto pueda tener. Dados dos elementos, estos pueden diferenciarse por las siguientes variables, que aparecen representadas



`Visualizacion/VariabesVisuales.pdf`

Figura 9.2: Ejemplo de uso de las distintas variables visuales. De izquierda a derecha: posición, forma, tamaño, tono, valor, textura, y orientación

en la figura 9.2: Posición, forma, tamaño, textura, color y orientación

El uso de la **posición** está muy restringido en el caso de un mapa, por deber respetarse el emplazamiento real en el espacio del elemento representado, y por ello y no se emplea.

La **forma** viene definida por el perímetro exterior del objeto. La forma se aplica fundamentalmente a los símbolos puntuales, situando un símbolo de una forma dada sobre las coordenadas exactas del punto

a representar. Su aplicación a símbolos lineales es difícil y no se da, mientras que en el caso de aplicarse sobre símbolos de superficie requiere la alteración de los polígonos representados (por ejemplo, que tracen los límites de países), dando lugar a una representación imprecisa, al menos en lo que al contorno del polígono respecta.

El **tamaño** se refiere a la dimensión del símbolo. Para el caso de símbolos puntuales, puede aplicarse sin más que hacer más grande o pequeño el símbolo en sí. En el caso de líneas, el grosor de estas constituye la forma de aplicar la variable tamaño. No se usa en símbolos superficiales, salvo aplicándolo sobre la textura de relleno.(Figura 9.3).

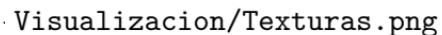
Visualizacion/Texturas.png

Figura 9.3: Uso del tamaño en símbolos de superficie mediante texturas.

El tamaño condiciona la percepción de otras variables visuales, especialmente cuando se trata de tamaños pequeños.

La **textura** hace referencia al relleno de un símbolo mediante algún patrón. Se aplica en líneas mediante el uso de guiones y espacios en blanco que dan lugar a un patrón de discontinuidad, aunque su uso principal es en el caso de símbolos de superficie.

El color es la más importante de todas las variables visuales, debido a las posibilidades que ofrece¹.

Dos son las componentes de un color que se utilizan como variables visuales, y que pueden entenderse como tales por si mismas: el tono y el valor.

¹Si estas leyendo una copia impresa de este libro, en blanco y negro, te recomiendo acudir a la versión digital, donde encontrarás las imágenes en colores.

El **tono** es lo que en el lenguaje común denominaríamos color, es decir el nombre del color, por ejemplo verde, rojo o amarillo.

El tono puede verse alterado por los tonos del entorno, especialmente en símbolos de pequeño tamaño. Aunque es una variable para la que la percepción humana tiene gran sensibilidad, en los símbolos pequeños puede ser difícil de identificar y pueden producirse una falsa percepción si comparten espacio con otras más grandes de un tono distinto.

Por su parte, el **valor** indica la claridad del color. Un tono azul puede ser más claro o más oscuro sin dejar de ser azul. Esa variación que se produce es una variación del valor del color.

La capacidad de diferenciar dos símbolos con valor distinto varía en función del tipo de símbolo. Así, es mayor en el caso de símbolos de superficie, mientras que en el caso de símbolos puntuales y lineales está relacionada con el tamaño. Si el punto es muy pequeño o la línea muy delgada, es más difícil apreciar el valor y, por tanto, comparar este con otro o extraer la información que mediante esa variable visual se intenta transmitir.

Por último, la **orientación** se aplica sobre los símbolos puntuales, siempre que estos no presenten simetrías que impidan percibir correctamente la orientación. Para los símbolos de superficie, se aplica a través de la textura, variando la orientación de esta. No se aplica en el caso de líneas.

Las propiedades de las variables visuales

Las variables que acabamos de ver son ahora nuestras herramientas que emplearemos para simbolizar la información geográfica y sabemos ya cómo aplicarlas. Lo que no hemos visto aún es qué capacidades tienen y

qué podemos simbolizar mediante ellas, y este es realmente el aspecto clave sobre el que deberemos decidir posteriormente cuando nos dispongamos a crear un mapa, para así seleccionar la variable visual más adecuada en función de aquello que queramos representar.

Se distinguen 4 propiedades básicas que una variable visual puede presentar:

- **Asociativa.** Una variable visual presenta la propiedad asociativa si al ser aplicada no aumenta ni disminuye la visibilidad de un elemento. Es decir, cuando en función de esa variable visual no puede asignársele más o menos importancia a este.
- **Selectiva.** La propiedad selectiva la presentan aquellas variables visuales que, al ser aplicadas, generan distintas categorías de símbolos.
- **Ordenada.** Cuando una variable visual puede emplearse para representar un orden, se dice que presenta la propiedad ordenada.
- **Cuantitativa.** Cuando, además del orden, una variable puede mostrar cantidades o proporciones, entonces se dice que posee la propiedad cuantitativa.

El orden en que se han presentado estas propiedades no es casual, ya que están ordenadas dando lugar a lo que Bertin denomina *niveles de organización*. La propiedad asociativa se sitúa en el nivel más bajo, mientras que la cuantitativa ocupa el más alto. El nivel de organización de las variables visuales tiene importancia a la hora de combinar varias de ellas en un símbolo, como veremos más adelante. Asimismo, y como detallaremos en el capítulo siguiente, el nivel de organización define qué tipo de información podemos transmitir con una variable visual.

Para ver más exactamente el significado de estas propiedades, estudiemos con detalle la figura 9.4, que muestra diferentes representaciones de un conjunto de símbolos (en este caso, símbolos puntuales) en los que en cada caso se ha utilizado únicamente una variable visual.

Conceptos_basicos/PropiedadesVar

Figura 9.4: Representación de un conjunto de símbolos aplicando de forma individual las distintas variables visuales.

Comenzando con la propiedad asociativa, vemos que a excepción del tamaño y el valor, las demás variables visuales no hacen que los elementos presenten una preponderancia en la imagen. No existen una orientación que podamos definir como más importante, ni tampoco un color. Lo mismo sucede con la textura, la forma y la posición. Podemos emplear una u otra forma, o una u otra textura, y con ello no conseguiremos llamar más la atención sobre un elemento en cuestión.

Con el tamaño, sin embargo, resulta claro que mayor tamaño implica un papel destacado dentro de la información que transmite el mapa. De igual modo, un mayor valor (un color más oscuro) da sensación de mayor definición, y centra la atención de observador sobre el elemento de un modo muy superior a como lo hace un valor bajo.

Respecto a la propiedad selectiva, diremos que una variable visual la presenta si de un vistazo podemos rápidamente seleccionar los elementos que pertenecen a un determinado grupo, identificados estos mediante dicha variable visual. El caso más claro de propiedad selectiva lo presenta el tono. Podemos rápidamente quedarnos solo con los elementos amarillos o con los rojos. Aunque no de un modo tan claro, todas las res-

tantes variables presentan igualmente esta propiedad, a excepción de la forma. La forma no permite que los elementos se agrupen de modo espontáneo en familias, y su validez en este sentido está muy ligada a la complejidad de dicha forma.

La propiedad ordenada la presentan aquellas variables que permiten establecer un orden. Tan solo posición, textura, tamaño y valor la presentan, mientras que las demás carecen de ella. Por ejemplo, en la imagen correspondiente a la variable visual tono no podemos decir cuáles de los elementos situaríamos al principio y cuáles al final de una escala dada definida por esos tonos. Con el valor, sin embargo, sí que podemos, ya que esta escala iría de los tonos más claros a los más oscuros, y visualmente podemos sin dificultad distinguir los distintos niveles y ordenarlos.

Por último, la propiedad cuantitativa la presentan aquellas variables visuales que permiten estimar proporciones o cantidades de forma visual. Esta propiedad es exclusiva del tamaño y de la posición, mientras que las demás no la presentan. Podemos visualmente estimar una distancia en comparación con otra y decir que es, por ejemplo, el doble de esta. También podemos ver que los círculos grandes en la figura correspondiente son aproximadamente el doble que los pequeños.

El valor, que ya sabemos que presenta la propiedad ordenada, podría pensarse que también presenta la propiedad cuantitativa, pero no sucede así. Es difícil e impreciso afirmar que un color es el doble de oscuro que otro, y lo más que podemos hacer es situarlo entre dos valores distintos (de ahí que posea la propiedad ordenada), pero no deducir una cifra que exprese una cantidad o proporción. Las restantes variables visuales resulta claro que no poseen esta propiedad.

En el cuadro 9 se muestra un resumen de todo lo anterior.

	Posición	Tamaño	Forma	Valor	Tono	Textura
Asociativa	◊	-	◊	-	◊	◊
Selectiva	◊	◊	-	◊	◊	◊
Ordenada	◊	◊	-	◊	-	-
Cuantitativa	◊	◊	-	-	-	-

Cuadro 9.1: Cuadro resumen con las propiedades de las variables visuales.

USO COMBINADO DE LAS VARIABLES VISUALES

Para explicar cada una de las variables visuales, hemos visto diversos ejemplos en los que utilizábamos cada una de ellas por separado y de forma única. Sin embargo, las variables visuales pueden combinarse y, si se hace de la manera correcta, esto reforzará la capacidad que estas tienen para transmitir una información dada. La imagen 9.5 muestra algunos ejemplos de combinación de variables visuales que nos servirán para detallar la forma adecuada de usar varias de ellas simultáneamente.

[Conceptos_basicos/CombinacionVariables](#)

Figura 9.5: Combinación de variables visuales.

El primero de los ejemplos propuestos muestra el uso combinado de las variables tamaño y forma para símbolos puntuales. Estos símbolos representan la

profundidad del suelo medida en determinados emplazamientos, estando relacionado un mayor tamaño del símbolo con una profundidad mayor. Asimismo, se ha asociado un símbolo triangular a los valores más bajos, un símbolo circular a los intermedios y uno cuadrado a los más altos. Aunque se emplean dos variables visuales distintas, el resultado no es, sin embargo, mejor que en caso de emplear uno solo de ellos (en este caso, debería emplearse el tamaño, ya que la forma no presenta la propiedad cuantitativa necesaria para representar cantidades). Lejos de producirse una sinergia entre el efecto de ambas variables, el resultado es similar al uso exclusivo del tamaño en cuanto a su capacidad de transmitir la información, o incluso peor, ya que la forma puede dificultar la estimación visual del tamaño, al ser más complicado comparar la dimensión de objetos de distinta forma.

Pese a que no es clara la ventaja de aplicar conjuntamente las variables forma y tamaño, esta puede emplearse para representar cantidades, por lo que podemos decir que mantiene la propiedad cuantitativa que posee el tamaño. En general, al combinar dos variables visuales el resultado presentara las propiedades de aquella que tenga un mayor nivel organizativo. Puesto que la propiedad cuantitativa representa el nivel organizativo superior, en este caso se mantiene en la combinación.

Aún así, hay mejores formas de combinar las variables visuales para que esta combinación enfatice en mayor grado la información que se pretende transmitir, como por ejemplo la mostrada en el segundo ejemplo. Este ejemplo combina el tamaño y el valor, variables ambas que no poseen la propiedad asociativa. Es decir, poseen su complementaria, que podríamos denominar

disociativa, y que, recordemos, es la propiedad que, al aplicarse sobre un símbolo, hace que este gane importancia visual. El resultado presenta un carácter todavía más disociativo, en cuanto que los símbolos que representan una cantidad elevada, al ser no solo grandes, sino estar pintados en color oscuro, llaman aún más nuestra atención que si empleáramos una única de las variables visuales utilizadas.

Como regla en este sentido, podemos decir que, cuando se combinan variables visuales que poseen una determinada propiedad, en el resultado esta propiedad queda reforzada con respecto a las variables individuales.

El tercer ejemplo nos muestra que combinar variables visuales con una misma propiedad no garantiza necesariamente que se vaya a producir una sinergia entre ellas, sino que, por el contrario, pueden anularse. Las variables empleadas en este caso son las mismas, valor y tamaño, pero se ha asociado el color claro a los valores mayores y el oscuro a los menores, de tal modo que los símbolos de mayor tamaño son más claros que los pequeños. Esto atenúa el efecto disociativo del tamaño, de forma que la representación es más difícil de interpretar y su información no se transmite de modo tan inmediato y directo.

En resumen, podemos sintetizar lo anterior diciendo que, a la hora de combinar variables visuales, deben tenerse en cuenta las propiedades de estas del mismo modo que cuando se emplean de forma individual. Las propiedades a reforzar serán aquellas que convengan más al tipo de información representado, y deben presentarlas todas las variables a combinar para que el efecto conjunto sea más acusado.

LA PERCEPCIÓN VISUAL

La percepción engloba toda la serie de procesos que convierten un fenómeno físico en una información acerca de nuestro entorno, a través de la estimulación de unos órganos perceptivos. La percepción tiene una fase física, una fisiológica (la estimulación en sí) y una psicológica (la interpretación del estímulo). En el caso de la percepción visual, este fenómeno físico es de tipo energético (la luz), y los órganos correspondientes son los ojos.

El estudio de la percepción es un fenómeno complejo que no entraremos a detallar, pero en el que resulta de interés profundizar para conocer algo más acerca de cómo la información que plasmamos en un mapa (que es un elemento visual) acaba convertida en una información en la mente del observador de ese mapa. Entender este proceso, al menos someramente, nos permitirá mejorar la eficacia de la percepción, de forma que tengamos una mayor garantía de que la información que transmitimos sea recibida e interpretada correctamente.

Dos son los aspectos que detallaremos en esta sección: las constancias perceptivas y las ayudas a la percepción. En otras palabras, hasta qué punto podemos modificar los elementos visuales o su entorno sin que dejen de transmitir su información y sean confundidos sus características, y cómo podemos facilitar que se perciban exactamente como pretendemos.

Las constancias y contrastes perceptivos

Entendemos por constancias perceptivas a las propiedades de los objetos cuya percepción no varía aunque se produzcan modificaciones. Podemos ver algunos

ejemplos para algunas de las variables visuales que conocemos.

Dado un objeto redondo tal como una rueda, si lo miramos en una dirección perpendicular aparecerá efectivamente como una forma circular perfecta. Sin embargo, si la miramos desde otro ángulo, veremos una forma elíptica, pero ello no nos lleva a pensar que la rueda en sí no sea ya redonda. Nuestra percepción de esa rueda es la misma, y podemos apreciar de igual modo su tamaño o su forma. Alterar el ángulo de visión no altera el objeto y la percepción que tenemos de él.

Del mismo modo, un elemento pintado de un color claro se identifica como tal aunque la luz sea tenue, y un elemento oscuro lo seguimos percibiendo como oscuro aunque estemos en unas condiciones de iluminación fuerte. Nuestro cerebro es capaz de interpretar simultáneamente el objeto y el contexto, y de este modo extraer las características de ese objeto, que no varían.

Estos dos ejemplos muestran la constancia perceptiva de la forma y el valor, y podemos buscar otros similares para otras variables visuales.

No todas las variables visuales tienen una constancia perceptiva como la anterior. Todos conocemos múltiples ejemplos de ilusiones ópticas en las que algo no parece lo que realmente es, y esa percepción errónea viene normalmente motivada por las condiciones en las que percibimos el objeto, por ejemplo debido al entorno particular en el que este se encuentra junto a otros objetos. La figura 9.6 muestra un ejemplo clásico de ilusión óptica, conocida como *ilusión de Zollner*. Las líneas largas diagonales son paralelas, pero no aparentan serlo, debido al efecto causado por las líneas más cortas. En este caso, no existe una constancia perceptiva de la variable visual orientación.

Cuando la percepción de un elemento cambia aunque el estímulo no lo haga, en lugar de una constancia perceptiva hablamos de un *contraste perceptivo*. Los contrastes perceptivos son importantes, ya que pueden inducir una interpretación errónea de la información que pretendemos transmitir, al producirse una percepción equivocada.

· Conceptos_básicos/Zollner_illu

Figura 9.6: Ilusión de Zollner que demuestra el contraste perceptivo de la orientación.

Las siguientes son algunas de las ideas más importantes a tener en cuenta a este respecto a la hora de crear un mapa:

- El tamaño es la variable visual que más afectada se ve, y el tamaño aparente de un objeto puede variar notablemente si se encuentra rodeado de otros de un tamaño distinto. La figura 9.7 muestra un ejemplo de esto. A la hora de emplear simbología de elementos puntuales en un mapa (por ejemplo, en un mapa de símbolos graduados, como veremos en el apartado ??), esto debe tenerse en cuenta, ya que pueden presentarse situaciones como la de la figura.
- El valor se ve igualmente alterado al situar alrededor elementos de distinto valor. Si el número de distintos valores es pequeño, es más difícil que aparezca este contraste perceptivo. A medida que se aumenta el número de estos, es más probable que aparezca en mayor o menor medida.
- El tono se ve alterado por la presencia de otros tonos distintos. En un mapa, veremos este efecto al enfrentar el color de un elemento sobre el color del fondo. Por ejemplo, si una línea que representa

a una carretera y cruza una serie de polígonos de distinto tono, puede parecer que el tono de la línea varía aunque en realidad sea constante.

- Tonos complementarios puestos juntos pueden crear sensación de vibración en la frontera que los separa.

· Conceptos_basicos/ContrasteTamaño

Figura 9.7: Contraste perceptivo del tamaño. Ambos círculos grises tienen el mismo tamaño, pero el de la izquierda aparenta ser mayor.

Ayudas a la percepción

Con lo que hemos visto anteriormente, queda claro que podemos alterar la forma en que se perciben las variables visuales que caracterizan a un elemento visual. Podemos usar este hecho para nuestro beneficio, de tal modo que el diseño de un mapa incorpore elementos que hagan más patente la información que este contiene, facilitando la correcta percepción del mapa en su conjunto.

Un factor clave en este sentido es la adecuada separación entre el fondo y la figura. Aquello que queremos que resulte visible con carácter principal (en el caso de un mapa, sus distintos elementos) debe separarse de aquello que constituye el fondo de la imagen, y debe atraer la atención del observador de manera prioritaria. En caso de no ser así, puede resultar difícil «descubrir» la información que el mapa transmite, al quedar esta al mismo nivel que la de otros elementos de menor importancia. El ejemplo clásico de la figura 9.8 ilustra este hecho. Puesto que no existe una diferenciación clara entre el fondo y la figura, no es obvio saber si la imagen pretende representar una copa o dos caras.

Figura 9.8: Sin un adecuado contraste entre fondo y figura la imagen presenta ambigüedad.

En un mapa, y como veremos en el próximo capítulo, encontramos dos tipos de cartografía: una con carácter de base que define un contexto geográfico, y una temática que constituye la información principal que se transmite con el mapa. Puesto que esta segunda es la fundamental y de mayor importancia, y la primera se incluye tan solo como apoyo de esta, es importante asegurarse de que esa cartografía base no interfiere y se mantiene en un segundo plano, constituyéndose como fondo y dejando que sea la información temática la que actúe como figura. Para ello podemos emplear las distintas variables visuales aplicadas a la cartografía base, de modo que su importancia relativa no sea mayor que la de los elementos principales de la parte temática.

Otro aspecto a considerar es la adecuada jerarquización entre los elementos del mapa. La división entre fondo y figura ya constituye en sí una jerarquización, pero no es suficiente si conviven varios tipos de elementos en el mapa. Dentro de la parte temática es necesario estructurar estos visualmente para que quede clara su importancia y se vea sin dificultad que existe una división entre ellos.

Esta jerarquía debe aportar una «profundidad» a la información, de forma que existan niveles en esta y se perciba que algunos elementos están por encima de otros. Como veremos en el capítulo ??, la forma de ordenar las distintas capas en un SIG ya establece un orden, aunque este no es en sí suficiente, y deben utilizarse las variables visuales para enfatizar o no unas o otras capas y la información que contienen.

Algunas técnicas básicas para esto son las que permiten que exista algún factor diferencial en la información más relevante. Si las propiedades de los elementos destacados difieren notablemente de las del fondo, esto centra la atención sobre ellas y garantiza que no se confundan con este. Emplear unas características más homogéneas para el fondo permite que la diferenciación de la figura sea más patente. En otras palabras, el contraste, aplicado este a todas las variables visuales, es una de las claves para lograr una adecuada transmisión de la información al emplear una representación visual.

El contraste se aplica no solo a las variables visuales, sino en general a las características de la representación. Por ejemplo, el nivel de detalle es una propiedad susceptible de ser utilizada para enfatizar algo. Así, y en el caso particular del documento cartográfico, el lector de un mapa espera que el detalle sea mayor en la cartografía temática que en la de base, ya que esta última es simplemente un elemento complementario de ayuda. Un mayor detalle sobre ciertos elementos llamará más la atención en contraste con un fondo menos detallado, y esto puede utilizarse para enfocar la atención sobre lo más relevante. Ofrecer menos detalle en la cartografía de base no es un inconveniente si esto ayuda a un mejor entendimiento de los elementos principales del mapa.

Como ejemplo de lo anterior, la figura 9.9 muestra un ejemplo de como una correcta jerarquización es fundamental para crear mapas de calidad.

Conceptos_básicos/JerarquiaMapa.

Figura 9.9: Mapa con jerarquía incorrecta (a) y mapa adecuadamente jerarquizado (b).

Por último, un aspecto clave para la claridad de un mapa es el relativo al poder separador. Este define

la capacidad de un individuo para distinguir objetos muy pequeños y separar objetos cercanos. Además de depender del propio individuo, está condicionado por una serie de factores.

Se admite en líneas generales que el límite de separación entre dos objetos para el ojo humano es de 0,2mm. Si existe una distancia menor entre ellos, en condiciones normales no será posible distinguir uno de otro.

Existe también un límite para poder reconocer objetos aislados, aunque este depende del tipo de objeto. Los siguientes son algunos de los aplicados usualmente:

- 0,2mm de diámetro para el caso de un punto.
- 0,5mm de grosor para el caso de una línea negra.
- 0,4mm de lado para el caso de un cuadrado negro.
- 0,6mm de lado para un cuadrado sin relleno.

Existe asimismo un umbral de diferenciación, que define el tamaño mínimo de dos objetos para que puedan ser percibidos como distintos. Este umbral también depende de las características de los objetos, como por ejemplo la forma (si las formas son muy distintas será más fácil distinguirlos que si son muy similares).

El poder separador no depende únicamente de variables de tipo espacial, sino que también está en relación con otras variables visuales. Por ejemplo, una línea negra sobre fondo blanco puede distinguirse aunque sea fina, pero en caso de ser amarilla sobre ese mismo fondo, será necesario un grosor mayor.

Como parece lógico, estos conceptos deben usarse para no incorporar a un mapa elementos que estén más allá del umbral de separación del lector del mapa, ya que en este caso no podrá extraer la información que se ha incorporado en este al crearlo.

