Introducción a los sistemas de información geográfica

Conceptos y operaciones fundamentales

PID_00250319

Antoni Pérez Navarro (coordinador)
Anna Muñoz
Jesús Rodríguez Lloret
Rosa Olivella
Víctor Velarde

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 8 horas

Universitat Oberta de Catalunya

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

Índice

Introducción 5

Objetivos 6

1. Qué son los sistemas de información geográfica 7
1.1. La información geográfica 7
1.2. Definición de los SIG: principales conceptos 8
1.2.1. Ejemplos prácticos de aplicaciones SIG 11
1.3. Tecnologías de la información geográfica 13
1.3.1. Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) 14
1.3.2. Teledetección y sensores remotos 15
1.3.3. Sistemas de información geográfica (SIG) 16
1.4. Cómo reconocer qué es un SIG 17
1.4.1. Los SIG como sistema 17
1.4.2. Los SIG como software 17

2. La naturaleza de los datos geográficos 19
2.1. Los datos geográficos 19
2.2. El componente espacial 20
2.2.1. La localización geográfica 20
2.2.2. Las propiedades espaciales 23
2.2.3. Las relaciones espaciales 24
2.3. El componente temático 26
2.3.1. Tipo de variables (atributos) 27
2.3.2. Escala de medición 29
2.4. El componente temporal 33
2.4.1. Representación de los procesos espacio-temporales 35

3. Funciones de los SIG 38
3.1. Entrada de datos 39
3.1.1. Digitalización 39
3.1.2. GPS 40
3.1.3. Teledetección 40
3.1.4. Información ciudadana 41
3.2. Almacenamiento y recuperación de información geográfica 42
3.2.1. Ficheros SIG 42
3.2.2. Bases de datos geográficas 43
3.2.3. Recuperación de información geográfica 44
3.3. Visualización de información geográfica 48
3.3.1. Variables visuales 48
3.3.2. Mapas temáticos 49

3.3.3. Otras formas de presentación de datos 58
3.4. Análisis *raster*..... 61
3.4.1. Operaciones locales 62
3.4.2. Operaciones de vecindad inmediata 64
3.4.3. Operaciones de vecindad extendida 66
3.4.4. Operaciones zonales 67
3.5. Análisis vectorial 67
3.5.1. Distancias, mediciones y análisis de proximidad 67
3.5.2. Superposición 69
3.5.3. Análisis de redes 71
3.5.4. Otros análisis 71

4. Los SIG en la sociedad actual..... 73
4.1. Para qué utilizamos un SIG 73
4.1.1. Aplicaciones de los SIG 75
4.2. Cómo trabajamos en SIG 89
4.2.1. Metodología de desarrollo de un SIG 91
4.3. Implicaciones sociales de los SIG 96
4.3.1. El código ético de los SIG 96

Glosario..... 99

Bibliografía..... 101

Introducción

En este módulo de sistemas de información geográfica (SIG), abordaremos en primer lugar el estudio del concepto de *sistema de información geográfica* mediante las preguntas ¿“qué son los SIG"? y ¿“qué no son"?

En la primera parte desglosaremos el término SIG en su mínima expresión para definir los conceptos de *sistema de información* e *información geográfica*, y analizaremos las diferentes tecnologías que trabajan en el entorno del SIG para diferenciar las que se consideran parte del SIG de las que no. Para completar esta primera parte, mostraremos algunos ejemplos prácticos de aplicaciones SIG. El listado de los campos en los cuales pueden aplicarse los SIG es enorme. Conocer algunos de éstos puede ser el punto de partida para que investiguéis los diferentes ejemplos que son interesantes y relevantes para vosotros.

En la segunda parte del módulo nos dedicaremos al estudio de los componentes y de las funcionalidades que forman un SIG, dedicando un apartado especial a la naturaleza de los datos geográficos. Los datos geográficos constituyen la parte del SIG mediante la cual representamos la realidad y, por lo tanto, merecen una especial atención. El conocimiento de la naturaleza de los datos geográficos es imprescindible para su posterior manejo en un SIG. En esta segunda parte, veréis que podemos tener tres tipos de componentes: espacial, temático o temporal.

En la tercera parte, veremos los SIG desde un punto de vista más técnico, desde la perspectiva del usuario. Os mostraremos sus principales funciones y cómo almacenar los datos y operar con ellos. También os mostraremos cómo llevar a cabo análisis de información geográfica, que es lo que os permitirá explotar un SIG y llevar a cabo tareas de valor añadido con él.

En la cuarta y última parte nos dedicaremos al análisis de la situación actual de los SIG en nuestra sociedad a partir de ejemplos reales de aplicaciones SIG en diferentes áreas tanto públicas como privadas. El último apartado del módulo lo destinaremos a describir diferentes programas informáticos de SIG disponibles en el mercado para acabar con la descripción de las diferentes clases de software según el tipo de licencia y el tipo de código.

Objetivos

1. Una vez finalizado el estudio de los materiales didácticos de este módulo, dispondréis de los conocimientos imprescindibles para alcanzar los objetivos siguientes:

2. Describir el potencial de los SIG en el contexto de la gestión, organización y difusión de la información.

3. Identificar y saber tratar diferentes naturalezas de datos geográficos con el que puede trabajar un SIG.

4. Definir y entender el papel que tienen los componentes y las funciones de un SIG.

5. Localizar recursos y fuentes de información relacionados con el mundo de los SIG.

6. Llevar a cabo análisis de datos geográficos sobre un SIG.

7. Desarrollar una visión general del papel de los SIG en la actual sociedad de la información: tanto con respecto a su gestión como a sus perspectivas de futuro.

1. Qué son los sistemas de información geográfica

Tradicionalmente unos pocos han utilizado los mapas, en papel, para representar el espacio geográfico y poder tomar decisiones sobre el territorio. Pero ¿qué ha sucedido en los últimos años con los mapas y su enorme popularización?

Los sistemas de información geográfica (SIG), con su rápida evolución y tecnología asociada, han sido responsables de una auténtica revolución digital en el mundo de la cartografía, del análisis espacial, de la planificación y de la gestión del territorio, y han abierto su uso a muchos más usuarios.

Con el fin de entender la naturaleza de estos sistemas, en este apartado se presentarán varias definiciones de los SIG, que dan respuesta a preguntas como: ¿qué son?, ¿es una tecnología útil para la resolución de problemas geográfico-espaciales?, ¿son simplemente un sistema para la generación de mapas?

1.1. La información geográfica

Casi todas las cosas que suceden, suceden en alguna parte, es decir tienen una *dimensión geográfica*. Muchas de las actividades humanas se desarrollan extensivamente sobre la superficie del globo terrestre, tales como túneles y carreteras, redes de tuberías para el agua y el gas, cables de electricidad, minas y perforaciones de petróleo y gas, etc. Todas estas actividades son de gran importancia económica y social, por lo que su manejo en el territorio es un elemento clave para las sociedades modernas.

Conocer dónde está sucediendo algo es de vital importancia: para trasladarse o enviar a alguien allí, encontrar información complementaria sobre esa misma ubicación o, simplemente, por ejemplo, informar a la gente que habita alrededor. Muchas decisiones políticas, estratégicas y de planificación de acciones sobre el territorio tienen además evidentes consecuencias geográficas.

En resumen, la **información geográfica** (IG) o **información georreferenciada** es información sobre un elemento en la superficie de la Tierra, un conocimiento sobre “dónde” está algo o “qué hay” en un determinado lugar.

A continuación, se recogen algunas **características clave** de la información geográfica:

- Es multidimensional: mediante dos coordenadas geográficas puede definirse cualquier posición en la superficie de la tierra (x, y o latitud, longitud). En este caso, sería bidimensional, o 2D, y es el tipo de información que se suele utilizar en los mapas. Actualmente, también se añade a menudo la tercera componente, z, que da la altura de un punto. Así, en este caso tendríamos información tridimensional o 3D.

- Depende de la resolución geográfica; la IG puede ser muy detallada (por ejemplo, información sobre la localización de todos los edificios en una ciudad, o sobre cada uno de los árboles en un bosque) o muy genérica (por ejemplo, el clima en una gran extensión, o la densidad de población en un país entero).

- Puede ser muy voluminosa. Por ejemplo: un solo satélite puede emitir cada día más de un terabyte (10^{12} bytes) y se necesitan varios gigabytes (1 Gb = 10^9 bytes) de datos para describir el callejero de una gran ciudad.

- Puede ser representada en diferentes formatos digitales, que pueden influenciar los análisis y los resultados obtenidos.

- Debe ser proyectada, a menudo, en una superficie plana.

- Requiere métodos especiales para su análisis.

1.2. Definición de los SIG: principales conceptos

Una vez abordado el concepto general de información geográfica (IG), se agrega aquí el concepto de **sistema**, es decir, la "S" complementaria para formar el acrónimo de SIG.

Es necesario entender cómo los SIG se desarrollan en el contexto de la sociedad de la información en general, y de los "sistemas de información" en particular, usados por las empresas y las Administraciones públicas para soportar sus decisiones operativas, de gestión y estratégicas.

Un **sistema de información** puede entenderse como:

- Un sistema automatizado o manual, que incluye personas, máquinas y otros métodos organizados para la recopilación, procesado, transmisión y distribución de datos que representan información de utilidad.

- Un equipo informático o de telecomunicaciones o sistema interconectado que se utiliza para la adquisición, almacenaje, manipulación, gestión, movimiento, control, representación, intercambio, transmisión o recepción de voz o datos, que incluye software y hardware.

En todo sistema de información es inherente la unión de la información y las herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con unos objetivos concretos (Peña, 2006). Un sistema de información se usa para manipular, consultar, editar, visualizar; generalmente, para trabajar con información almacenada en una base de datos. Por ejemplo, un sistema de información muy común en el sector turístico empresarial son los *data warehouse*. Los *data warehouse* (almacén de datos en castellano) son unas bases de datos diseñadas y estructuradas para su consulta y el soporte posterior a la toma de decisiones.

Lectura recomendada

J. Peña Llopis (2006). *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Alicante: Editorial Club Universitario.

Por otra parte, al incluir el término *geográfica* se asume que la información en un SIG es **espacialmente explícita**, es decir, que incluye la posición en el espacio (Peña, 2006).

$$SI + IG = SIG$$

A lo largo de los años se han propuesto muchas definiciones de los SIG, en las que los autores acentúan diversos aspectos, como la componente de base de datos o bien el hecho de ser una herramienta de apoyo para la toma de decisiones. En lo que coinciden de forma general es en incorporar como clave software con capacidad para trabajar con información espacial; estos datos espaciales son el elemento diferenciador y más importante, al poder trasladarse a un mapa geográfico.

A continuación, se exponen algunas definiciones significativas.

Un sistema de información geográfica es "un sistema de hardware, software, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales para la recopilación, almacenaje, análisis y distribución de información de territorios de la Tierra" (Deuker y Kjerne, 1989).

Lectura complenetaria

K. J. Deuker; D. Kjerne (1989). "Multipurpose Cadastre Terms and Definitions". *Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, and American Congress on Surveying and Mapping* (pág. 12). Falls Church, VA.

Chrisman (2003) define los SIG basándose en las actividades que permiten. Los SIG son las acciones organizadas con las que las personas miden aspectos de fenómenos y procesos geográficos para enfatizar temas espaciales, entidades y relaciones. Operan bajo estas representaciones, realizan más mediciones, descubren nuevas relaciones mediante la integración de diferentes fuentes y transforman estas representaciones.

Lectura recomendada

N. R. Chrisman (2003). *Exploring Geographical Information Systems* (2.ª ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

Burrough, en cambio, recoge definiciones basadas en tres categorías:

1) Una poderosa "caja de herramientas" para recolectar, almacenar, recuperar, transformar y visualizar datos del mundo real (Burrough, 1988).

2) Un sistema de bases de datos en el que la mayoría de datos están indexados geográficamente y con los que se puede realizar un conjunto de procedimientos con el objetivo de dar respuesta a consultas sobre entidades espaciales en la base de datos (Smith y otros, 1987).

3) Una entidad institucional con una estructura organizativa que integra tecnología con bases de datos, expertos y ayuda económica continuada (Carter, 1989).

Lecturas recomendadas

P. A. Burrough; R. A. McDonnell (1998). *Principles of geographic information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon.

J. R. Carter (1989). "On defining the geographic information system". En: W. J. Ripple (ed.). *Fundamentals of geographic information systems: a compendium*. Falls Church Virginia: ASPRS/ACSM.

T. R. Smith; S. Menon; J. L. Star; J. E. Estes (1987). "Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems". *International Journal of Geographic Information Systems* (vol. 1, n.º 1, págs. 13-31).

Además, los SIG se pueden definir dependiendo de los grupos de personas que los utilizan (Longley y otros, 2001) de la siguiente forma:

- Un contenedor de mapas digitales (el público general).
- Un conjunto de herramientas para la resolución de problemas geográficos (gestores, planificadores).
- Un sistema de ayuda a la toma de decisiones espaciales (gestores científicos e investigadores).

Lectura recomendada

P. A. Longley; M. F. Goodchild; D. J. Maguire; D. W. Rhind (2001). *Geographic Information Systems and Science* (1.ª ed.). Ed. Wiley. ESRI PRESS.

- Un inventario mecanizado de capas geográficamente distribuidas y servicios (gestores de recursos, responsables de logística).

- Una herramienta para la demostración de aquello que es invisible en la información geográfica (científicos e investigadores).

- Una herramienta para realizar operaciones con datos espaciales que son demasiado pesados, costosos o imprecisos si se hacen manualmente (gestores de recursos, planificadores, cartógrafos).

1.2.1. Ejemplos prácticos de aplicaciones SIG

Los SIG pueden aplicarse a una diversidad notable de problemas espaciales, desde situaciones rutinarias como elegir la mejor ruta en un desplazamiento en coche hasta problemas extraordinarios, como la gestión rápida de catástrofes o problemas de planificación territorial complejos.

De forma general, las cuestiones espaciales básicas que se pueden investigar con un SIG son:

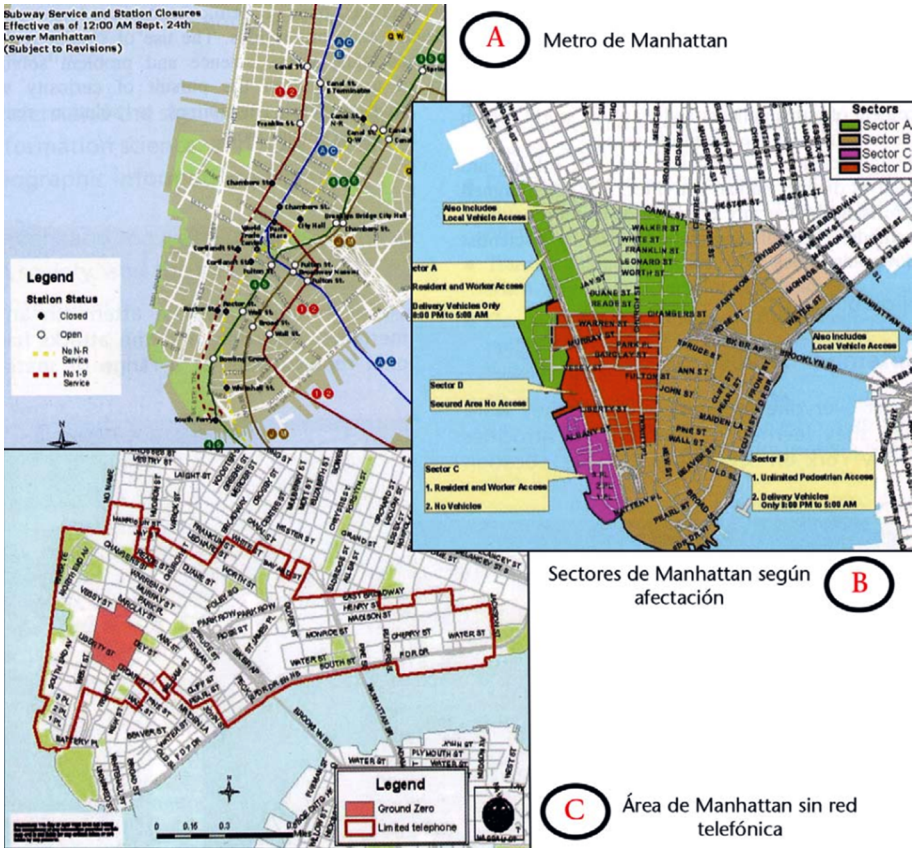
- Localización: ¿Qué hay en…?
- Condición: ¿Dónde sucede qué...?
- Tendencias: ¿Qué ha cambiado...?
- Rutas: ¿Cuál es el camino óptimo...?
- Pautas: ¿Qué pautas existen...?
- Modelos: ¿Qué ocurriría si...?

A continuación, se presentan algunos ejemplos de uso de los SIG.

Un ejemplo destacado de gestión eficiente de la información espacial y temporal se produjo en los atentados terroristas del 11 de septiembre de 2001 en Nueva York, como se refleja en la figura 1. La localización espacial fue un elemento crucial para dar la alerta de emergencia después del primer ataque. Se actuó según dos factores claves: el espacial (geográfico), que hace referencia a la zona afectada; y el temporal, según el cual se actuó.

A corto plazo, se activó el sistema de evacuación de emergencia y la suspensión y seguimiento del sistema financiero de la Bolsa de Nueva York. A medio plazo, se bloquearon las partes del metro de Nueva York que corrían bajo la zona de las torres gemelas y se gestionaron las zonas que quedaban afectadas para evacuar a las personas involucradas. En la figura 1A se observa el mapa del metro de Manhattan, con las estaciones abiertas y cerradas; el punto negro representa una estación cerrada y el punto blanco, una abierta.

Figura 1. Planes de actuación durante los atentados del 11 de septiembre en Nueva York



En los atentados terroristas del 11 de septiembre de 2001 en Nueva York, la gestión eficiente de información espacial y temporal fue imprescindible. Los SIG fueron las herramientas utilizadas para diseñar los planes de actuación de los servicios de emergencia, las evacuaciones y las actuaciones de recuperación de la zona. Fuente: imagen adaptada de Longley y otros (2005).

En la figura 1B se muestra la zona dividida en sectores según el grado de afectación. Dependiendo de la zona sólo se permitía acceder o evacuar residentes, trabajadores, personal de rescate, etc.

Finalmente, a más largo plazo, se analizaron los daños producidos en los servicios de telefonía, luz, gas, etc. En la figura 1C se aprecia la zona cero y un área a su alrededor que marca la zona sin línea telefónica.

Aunque el despliegue y la gestión de información geográfica en ese momento fueron mucho más amplios, este pequeño ejemplo de algunas de las aplicaciones que se llevaron a cabo ayuda a entender la importancia de un SIG en la gestión territorial.

Otros ejemplos

A continuación, se exponen otros ejemplos donde los SIG dan solución a problemas geográficos comunes y que se repiten periódicamente en el tiempo:

- Proporcionar información al Ministerio de Salud para saber dónde levantar nuevos hospitales y clínicas en un territorio en concreto.

- Proporcionar información a las compañías de transporte y reparto que están interesadas en saber o descubrir nuevas rutas más cortas, económicas o simplemente viables para que se ajuste al programa de reparto diario.

- Proporcionar información a las autoridades de las infraestructuras viarias de un país para la nueva selección de rutas para construir autopistas o nuevas vías de comunicación en general.

- Proporcionar información a empresas para localizar el mejor punto geográfico para construir un negocio según el tipo de producto que van a comercializar.

- Proporcionar información a las compañías forestales para determinar cuál es la mejor manera de gestionar un bosque, o por dónde hay que hacer pasar una carretera o bien dónde se tendrá que reforestar con nuevos árboles.

- Proporcionar información a los gobiernos para decidir dónde destinar los fondos económicos para el desarrollo del país.

- Proporcionar información a los viajeros y turistas a la hora de seleccionar rutas, hoteles y puntos de interés de la zona.

- Proporcionar información a los agricultores para asesorar en la toma de decisiones de, por ejemplo, cuántos fertilizantes y pesticidas se utilizarán y se aplicarán en las diferentes partes del campo de cultivo.

- Proporcionar a un ciudadano información sobre el impacto del cambio climático en el ámbito costero de su región, de acuerdo a un estudio que modela su horizonte según varios escenarios.

- Proporcionar al gestor de una refinería un modelo que calcula y visualiza en un mapa la previsión de trayectoria de un derrame, para poder gestionar las operaciones de recogida y limpieza ambiental.

- Proporcionar información al habitante de una ciudad de la categoría urbanística de las parcelas del municipio, tal y como ha sido determinada por un nuevo Plan General.

- Proporcionar al lector de un medio digital una visualización interactiva en forma de mapa para saber cómo se ha desarrollado la evolución de un conflicto armado.

- Proporcionar al colectivo interesado en la previsión de condiciones marinas (pescadores, autoridades portuarias, practicantes de surf…) un mapa con la previsión de vientos y corrientes.

- Proporcionar a un grupo de voluntarios ambientales una plataforma en línea para mostrar todos los puntos de vertido que han detectado en sus reconocimientos de campo.

- Etcétera.

Todos estos ejemplos muestran que los SIG son, fundamentalmente, aplicaciones de trabajo utilizadas para la resolución de problemas espaciales. Además, los SIG son cada vez más ampliamente empleados por instituciones académicas, agencias del gobierno, corporaciones, asociaciones e individuos.

1.3. Tecnologías de la información geográfica

Hasta ahora se ha presentado qué es la información geográfica, qué es un sistema de información y cómo se relacionan ambos conceptos para dar lugar a los sistemas de información geográfica. A la vez, también se han visto diferentes definiciones de SIG y sus aplicaciones en diversos ámbitos.

Pero ¿cómo se obtiene y procesa toda esta información necesaria para llevar a cabo la resolución de un problema espacial?

La obtención de los datos e información y el posterior procesado no sería posible sin las denominadas **tecnologías de la información geográfica** (TIG):

- Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS).
- Teledetección y sensores remotos.
- Sistemas de información geográfica (SIG).

A continuación, se tratan de forma introductoria estas tecnologías, con el objetivo de entender el papel que juegan en el mundo de los SIG.

1.3.1. Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS)

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite, *Global Navigation Satellite System* (GNSS), son sistemas utilizados para determinar la posición geográfica de un usuario a través de un receptor que, en cualquier lugar del mundo, recibe las señales transmitidas por una constelación de satélites. Actualmente, el más conocido de los sistemas GNSS es el GPS (*global positioning system*, sistema de posicionamiento global).

El sistema GPS está constituido por un conjunto de satélites en órbita alrededor de la Tierra que proveen señales disponibles en cualquier punto de la superficie de la Tierra, las 24 horas del día los 365 días del año, y que se utilizan para determinar el tiempo preciso y la posición en tres dimensiones de un receptor GPS. El GPS fue desarrollado y está controlado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para aplicaciones militares, aunque está permitido el uso civil para georreferenciar posiciones, para la navegación, y como patrón de tiempo y de frecuencia.

Actualmente, además del GPS de los Estados Unidos, existen el sistema ruso GLONASS y el sistema chino BEIDOU. Por su parte, la Unión Europea desarrolla el sistema GALILEO.

Cada uno de estos sistemas emplea una constelación propia de satélites que orbitan la Tierra y trabajan en conjunción con una red de estaciones fijas en la superficie terrestre. En la figura 2 se representan la Tierra y los diversos satélites y órbitas que forman parte de la constelación GPS.

Figura 2. Sistema de satélites GPS alrededor de la Tierra

El GPS opera mediante una constelación de 24 satélites con trayectorias sincronizadas cuyas transmisiones de señales de navegación cubren la superficie de la Tierra.
Fuente: http://garmin.com.

El usuario recibe las señales emitidas por los satélites GNSS a través de un receptor específico para cada sistema GNSS. Actualmente, existen en el mercado receptores portátiles de pequeño tamaño y a un precio asequible. De hecho, la mayoría de *smartphones* actuales son receptores de GPS y GLONASS. A través de estos receptores se obtienen mediciones de la posición del receptor en la superficie terrestre expresadas en latitud, longitud y altura.

El uso de los GNSS se ha generalizado en la obtención de datos para los SIG, para localización precisa de los datos espaciales y para la obtención de todo tipo de datos de campo. El uso eficiente de un sistema GNSS necesita un equipamiento apropiado, un tiempo de aprendizaje de las técnicas de obtención de datos y el conocimiento de las limitaciones del sistema.

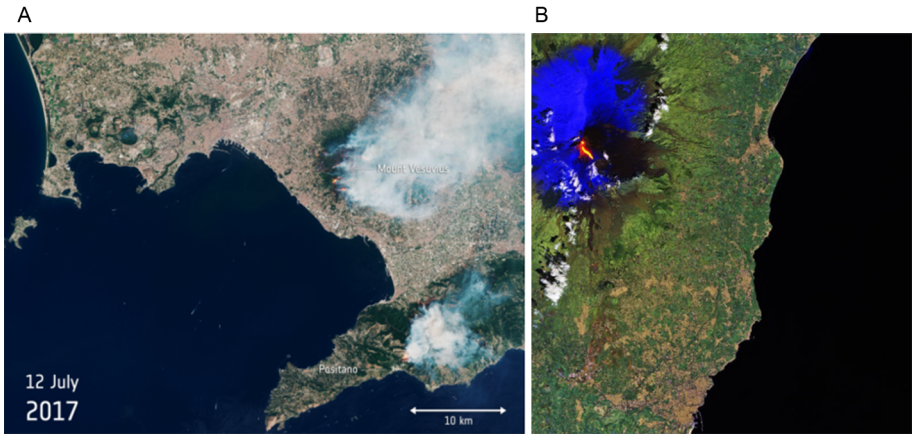
1.3.2. Teledetección y sensores remotos

Otras tecnologías para adquirir y procesar información geográfica son todas aquellas relacionadas con la teledetección. La teledetección, o percepción remota, es la técnica que permite la obtención de imágenes de la superficie terrestre a partir del análisis manual o automático de los datos obtenidos desde plataformas como satélites, aviones o drones. Las imágenes, fuente de datos para la teledetección, se capturan a través de sensores.

Los sensores remotos están situados en los satélites que orbitan la Tierra y se utilizan para capturar información de la superficie terrestre y de la atmósfera. Los sensores varían según el nivel de detalle que permiten visualizar y el rango del espectro electromagnético que detectan. Las señales se transmiten a estaciones receptoras en la superficie de la Tierra, donde se procesan y transforman en imágenes digitales para más tarde diseminarlas a los usuarios finales.

A continuación, se ilustra lo dicho anteriormente con unos ejemplos:

Figura 3. Imágenes de satélite Sentinel-2



Erupciones de volcanes: A) Vesubio; B) Etna. Fuente: http://www.esa.int/spaceinimages/Images.

En la figura 3A podéis ver una imagen del satélite Copernicus Sentinel-2B del volcán Vesubio en erupción, en las proximidades de Nápoles, en julio de 2017. Se observa en color blanco la columna de humo que emerge del cráter.

En la figura 3B se muestra otra imagen del Copernicus Sentinel-2A, esta vez del volcán Etna. En ella, se puede apreciar el color rojo de la lava fluyendo y cómo la nieve ha sido coloreada en azul, para así distinguirla de las nubes

1.3.3. Sistemas de información geográfica (SIG)

Finalmente, se cierra este apartado tal y como comienza: con los sistemas de información geográfica. Una vez repasados los principales conceptos de los SIG, se puede llegar a la conclusión de que también son una **tecnología de la información geográfica**. Los SIG son sistemas para la entrada, almacenaje, manipulación y salida de información geográfica. Se consideran también una clase de software y, aunque en ocasiones hayan podido ser identificados con categorías de software relacionadas (cartografía digital, sistemas CAD o SGBD), se diferencian de éstos fundamentalmente por sus capacidades analíticas, que se presentan en próximos apartados.

Un ejemplo práctico de **un SIG combina software con hardware, datos, usuarios y unos procedimientos**.

Finalmente, el conjunto de todas las tecnologías presentadas define lo que se conoce como tecnologías de la información geográfica, las TIG.

1.4. Cómo reconocer qué es un SIG

Una vez visto lo que es un SIG, ¿cómo reconocerlo? Existen al respecto dos posiciones:

- Desde el punto de vista de sistema.
- Desde el punto de vista de software.

1.4.1. Los SIG como sistema

Desde el punto de vista de un sistema, los SIG se reconocen por una serie de características:

a) Almacenan mapas e imágenes.

b) Incluyen herramientas para:

- Procesar información.

- Disponer de funciones especiales para trabajar con la información geográfica como: visualizar en pantalla, editar, modificar, transformar, medir distancias y áreas, combinar mapas, etc.

c) Disponen de funciones especializadas como:

- Mantener inventarios.
- Gestionar propiedades.
- Permitir evaluar la idoneidad de las actuaciones previstas en diferentes áreas.

d) Producen nueva información mediante la fusión de información existente en diferentes formatos. Esta información generada puede ser de gran utilidad. Los mapas son sólo un método de representación de la información espacial, pero los SIG permiten ver la información espacial desde diferentes puntos de vista, que sirven de ayuda para la toma de decisiones.

e) Utilizan una infraestructura hardware importante, compuesta por servidores y redes para servir y analizar información geográfica.

1.4.2. Los SIG como software

Desde el punto de vista del software, los SIG se reconocen a través de las siguientes características:

a) Es un tipo de software cuyas funciones generalmente incluyen: entrada, procesado o representación de datos espaciales.

b) Este software se distribuye como:

- Paquete de instalación de escritorio, para usuarios como investigadores y técnicos especialistas.

- Componentes para servidor, en entornos corporativos o de libre acceso, para poder almacenar o servir datos en mayor volumen.

- Bibliotecas software, para que los desarrolladores generen aplicaciones o *scripts* personalizados con componente espacial.

c) Es distribuido por empresas del sector geoespacial como ESRI o Intergraph como software privativo, o bien es un producto bajo auspicio de la fundación OSGeo, para el fomento de software libre geoespacial, como QGIS, gvSIG, Geoserver o MapServer. Cabe decir, sin embargo, que en el mundo del software libre existe software SIG que no está dentro de la fundación OSGeo, ya que para ello es necesario solicitar el acceso y el proceso puede ser largo.

Un SIG puede producir mapas profesionales de excelente calidad gráfica con una gran diversidad de símbolos, a diferentes escalas y proyecciones. Pero un SIG puede hacer mucho más que eso. En realidad, un SIG nunca presenta mapas de forma convencional, sino como una **base de datos** de coordenadas o como una colección de celdas. A partir de esta base de datos podemos producir mapas en el momento que se requiera. Además de producir y almacenar mapas, un SIG puede procesarlos, ya que los datos están almacenados en forma de modelo digital del mundo real, a diferencia de los mapas de papel convencionales.

2. La naturaleza de los datos geográficos

Los apartados anteriores se han dedicado a la identificación de un sistema de información geográfica en general, pero sin entrar en detalle en las funciones, componentes y otros factores que interactúan. De ahora en adelante, trataremos estos aspectos más puntuales para ver cómo se han desarrollado en un entorno SIG.

En este apartado abordaremos los datos geográficos. Estos datos tienen la peculiaridad de que vinculan los atributos con el lugar y el tiempo. Es decir, los datos geográficos están formados por tres componentes: un componente espacial, uno temporal y uno temático.

Los **datos son el elemento clave** de un SIG. La preparación de un adecuado conjunto de datos es clave para poder llevar adelante con garantías todo proyecto SIG (Olaya, 2014).

2.1. Los datos geográficos

Empezaremos tratando los principios fundamentales para poder entender las diferentes formas de representación de lo que ya apuntábamos en el subapartado 1.1. Recordad que la información geográfica es información sobre un elemento situado en la superficie de la Tierra, es el conocimiento sobre **dónde hay** algo o **qué hay** en un determinado lugar, pero ¿de dónde sale toda esa información y cómo se trata? Hasta ahora sabemos que un SIG almacena y gestiona información, entre otras características, pero ¿dónde y cómo se recoge esta información?

Los datos geográficos son la parte del SIG mediante la cual representamos la realidad y, a su vez, permiten enlazarla con situaciones y aplicaciones específicas. Los datos son una **abstracción de la realidad** y los almacenamos como códigos en formato digital.

Los **datos son la representación concreta de hechos** y constituyen el antecedente necesario para el conocimiento de un fenómeno. La información almacenada en una base de datos se obtiene para una finalidad determinada y es fruto de un proceso interpretativo del usuario (Comas y Ruiz, 1993).

Por lo tanto, podemos considerar los datos geográficos como información sobre la localización de los fenómenos del mundo real. Es decir, dan respuestas a las preguntas originales que se habían planteado: **qué**, **dónde** y **cuándo**.

Tal como decíamos, los datos geográficos presentan tres tipos de componentes:

- un componente **espacial**, que contiene información asociada sobre la localización geográfica,

- un componente **temporal**, que lleva asociada información del momento en que se produjo el evento representado,

- y un componente de **atributo**, que contiene el resto de información descriptiva del elemento que llamaremos información temática.

Por ejemplo, si tomamos como elemento geográfico el eje de una vía de comunicación: conocemos su ubicación y la forma del trazado (componente espacial), la fecha a la que corresponde ese trazado que nos permitirá analizar la evolución espacio-temporal de la vía (componente temporal), así como información relativa al tipo de vía (por ejemplo, si es autopista, autovía, sendero…), si tiene o no márgenes, el nombre de la vía, etc. (componente temático).

A continuación, analizaremos cada uno de estos tres componentes por separado.

2.2. El componente espacial

Cuando hablamos del componente espacial hacemos referencia a la localización geográfica dentro de un sistema de referencia establecido, a las propiedades espaciales de los objetos y a las relaciones espaciales que hay entre éstos. Este componente da respuesta a la pregunta **dónde**.

2.2.1. La localización geográfica

El lugar o localización geográfica hace referencia a la posición de los objetos sobre la superficie de la Tierra, utilizando, por ejemplo, coordenadas geográficas o direcciones postales. Además, dependiendo de sus dimensiones espaciales, los objetos pueden tener cierto tamaño: la longitud de una carretera, el área de un bosque o el volumen de una masa de agua. Este componente es esencial en un sistema de información geográfica.

La localización de los objetos en el espacio se realiza mediante un sistema de coordenadas y varía según el modelo de representación de los datos presentados:

1) Modelo vectorial, donde las entidades del mundo real se representan mediante puntos, líneas y polígonos:

- Punto: localizado en el espacio por un par de coordenadas X e Y, como por ejemplo un pozo, una fuente, un vértice geodésico, etc.

- Línea: localizada a partir de las coordenadas de los puntos que la definen, como por ejemplo un curso fluvial, un sendero o una línea de ferrocarril.

- Polígono: localizado a partir de las coordenadas de las líneas que lo cierran, como por ejemplo un estanque, una parcela, etc.

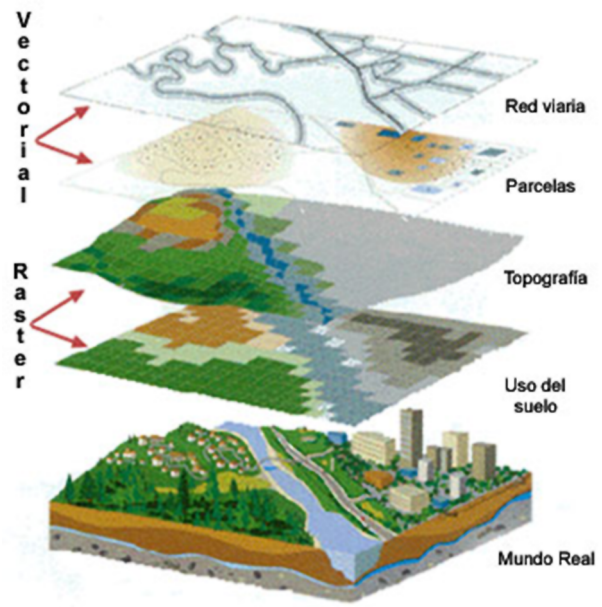
2) Modelo *raster*, donde la representación de las entidades del mundo real se realiza mediante una imagen. En este modelo la localización de los objetos se realiza por medio de filas y columnas de píxeles, lo que también se conoce como una malla regular de celdas (ver figura 5).

Celda o píxel

Es la mínima unidad en que se descompone una imagen digital.

En la figura 4 podéis ver cómo se representan algunas entidades del mundo real según el modelo vectorial, como por ejemplo la red viaria, o bien según el modelo *raster*, como por ejemplo los usos del suelo.

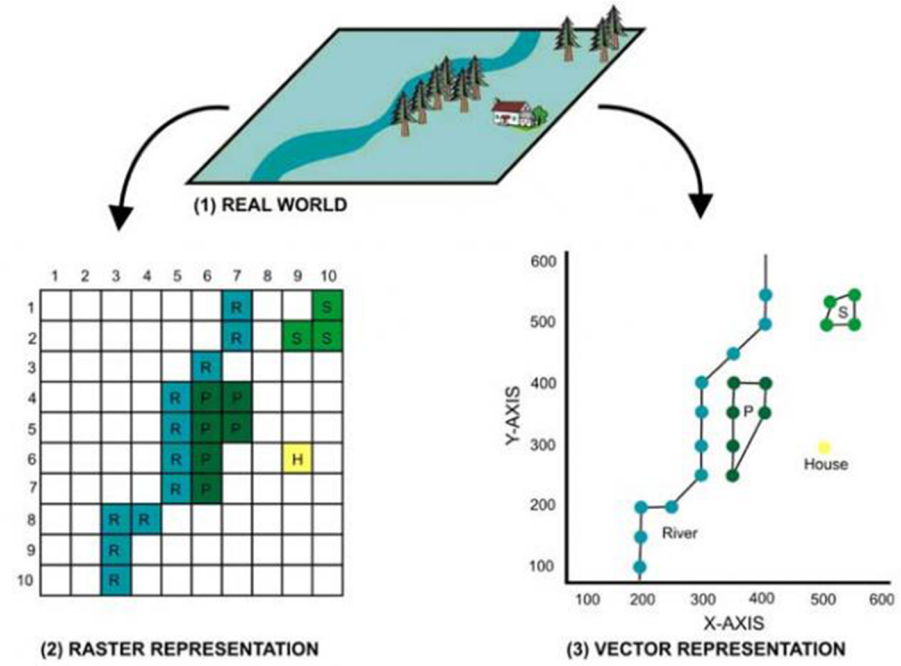
Figura 4. Diferentes capas de información de un SIG



Fuente: National Coastal Data Development Centre (NCDDC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), USA.

En particular, la figura 5 muestra cómo se representa en el modelo de datos *raster* y vectorial un mismo espacio geográfico.

Figura 5. Modelos de representación *raster* y vectorial



Fuente: ArcGIS Desktop Help Online.

Los datos modelados en un *raster* pueden ser discretos o continuos.

Los datos *raster* **discretos** se llaman también datos *raster* temáticos y estructuran la información por categorías, como por ejemplo los usos del suelo. Los datos *raster* **continuos** son *grids*, o mallas de celdas, que representan valores que cambian de manera gradual, como por ejemplo la altura, la temperatura o las fotografías aéreas o las de satélite.

Una forma habitual en que encontramos datos *raster* en un SIG son las imágenes obtenidas desde satélites, que no siempre son fáciles de interpretar. Intentad resolver el siguiente ejercicio; ¿qué creéis que representan los círculos azules de la figura 6?

Figura 6. What are the blue circles?

Fuente: Patrick Clement; http://perso.telecom-paristech.fr/~clement/images-satellites/pages/Irrigation-Libye.htm.

2.2.2. Las propiedades espaciales

Los elementos que representan la realidad tienen ciertas propiedades espaciales, como por ejemplo la longitud, la forma, la pendiente, la orientación, la superficie o el perímetro. Al mismo tiempo, estas propiedades también varían según si utilizamos un modelo vectorial o un modelo *raster*.

1) Modelo vectorial:

- Puntos: en el caso de los puntos, no presentan ninguna de las propiedades espaciales enumeradas anteriormente.

- Líneas: en el caso de las líneas, las propiedades espaciales de las líneas son la longitud, la forma, la pendiente y la orientación.

- Polígonos: en el caso de los polígonos, se pueden identificar la superficie, el perímetro, la forma, la pendiente y la orientación.

2) Modelo *raster*. Malla de celdas: en el caso del modelo *raster*, se forman conjuntos de celdas (llamadas zonas) que se pueden tratar como polígonos para analizar sus propiedades espaciales de la misma manera. Es decir: superficie, perímetro, forma, pendiente y orientación.

Un sistema SIG puede calcular algunas de estas propiedades automáticamente, como ocurre en el caso del perímetro y la superficie de los polígonos, y la longitud de una línea. El resto, sin embargo, debe calcularlas o indicarlas el usuario.

2.2.3. Las relaciones espaciales

Finalmente, el último aspecto que queda por explicar en relación con el componente espacial es el que también hemos introducido al principio de este apartado: las relaciones espaciales.

En este punto incluimos relaciones espaciales como la proximidad, la contigüidad, la conectividad, la inclusividad, etc. También se presentan entre diferentes objetos espaciales, pero no necesariamente deben almacenarse directamente en un SIG. Las hay que están explícitamente definidas en un SIG, otras se calculan cuando se requieren o sencillamente no están disponibles (Aronoff, 1989).

Relaciones espaciales:

- La proximidad es la cercanía en el espacio o en el tiempo.
- La contigüidad es la cercanía entre ambas cosas.
- La conectividad es la cualidad de conexión.
- La inclusividad es la cualidad de solapar.

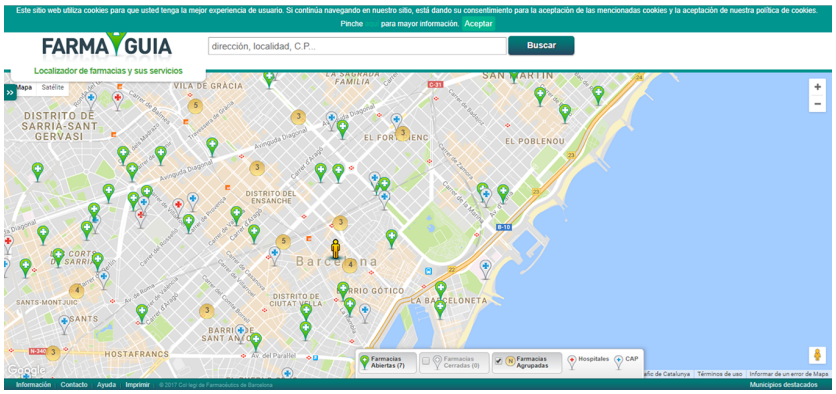
Proximidad

Cercanía en el espacio o en el tiempo.

Ejemplo 1 de relación espacial: proximidad

La figura 7 muestra la aplicación Farmaguía, que permite buscar dentro de una localidad las farmacias más cercanas a un punto dado. En la imagen podemos ver la posición actual simbolizada mediante un muñeco y los iconos verdes con la ubicación de las farmacias de la zona.

Figura 7. Localizador de farmacias y sus servicios



Fuente: http://www.farmaguia.net/desktop/es/.

Contigüidad

Cercanía entre dos cosas.

Ejemplo 2 de relación espacial: contigüidad

En la figura 8 podéis ver el mapa del tranvía denominado Trambesòs, que va desde la estación de Ciutadella Vila Olímpica a la estación de Glòries, pasando por la estación de Marina en la Línea T4. En este caso, una relación espacial entre los "objetos estaciones" sería la de contigüidad: "La estación Marina se encuentra entre las estaciones de Ciutadella Vila Olímpica y Glòries".

Figura 8. Líneas T4, T5 y T6 del Trambesòs

Fuente: https://barcelonando.com/barcelona-tram-2.

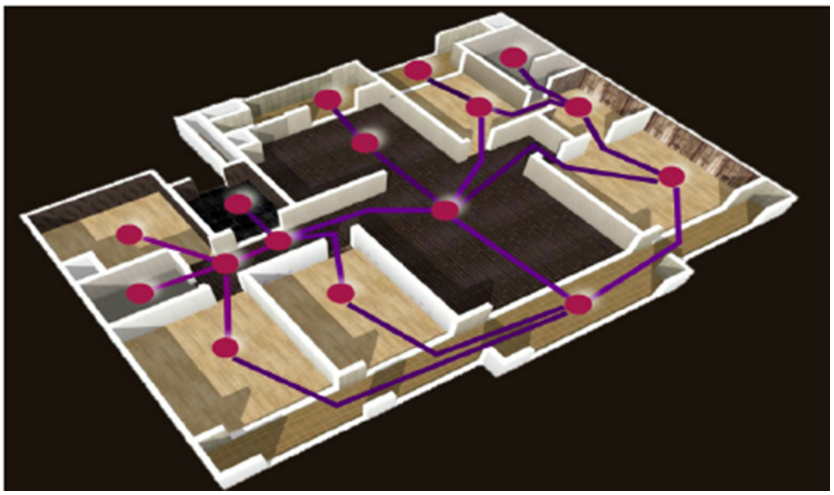
Ejemplo 3 de relación espacial: conectividad

Conectividad

Cualidad de conexión.

En la figura 9 podéis ver otro ejemplo más complejo donde se muestra la relación espacial entre los nodos del grafo de navegación correspondiente a un espacio interior en formato indoorGML. La relación entre los nodos también es de contigüidad, como en el ejemplo anterior. En este caso, también podemos ver que los espacios definidos por las habitaciones también están conectados.

Figura 9. Grafo de navegación sobre modelo de datos en formato indoorGML



Fuente: OGC; http://indoorgml.net/.

Ejemplo 4 de relación espacial: inclusividad

Inclusividad

Cualidad de inclusión.

La relación de inclusividad se produce cuando un objeto geográfico solapa o está incluido dentro de otro. La aplicación Farmaguía sería un ejemplo de inclusividad de puntos en polígonos, como es el caso de las farmacias que pertenecen al municipio seleccionado.

Estos ejemplos muestran la existencia de dos tipos de relaciones espaciales:

- Las **relaciones topológicas**: son las de tipo cualitativo. Es decir, son relaciones que responden, por ejemplo, a la contigüidad (si dos polígonos son limítrofes), a la inclusión (si un polígono está contenido en el otro), a la conectividad (si dos líneas están conectadas), etc.

- Las **relaciones geométricas**: son de tipo cuantitativo y son las que se calculan a partir de las coordenadas de los objetos.

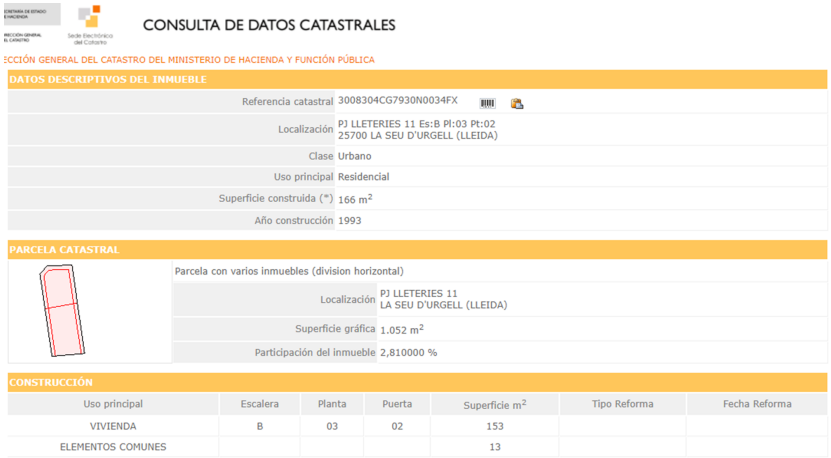
2.3. El componente temático

El componente temático se refiere a las características de los objetos presentados en un SIG utilizados para representar el mundo real. Estas características se conocen como **atributos** o **variables** a componente temática que responde a la pregunta **qué** y va siempre unida a la componente espacial.

Ejemplos de atributos

En la figura 10 podéis ver ejemplos de atributos (variables) relativos a diferentes objetos representados, como son las parcelas del catastro de la provincia de Barcelona coloreadas según su año de construcción.

Figura 10. Ejemplo de atributos asignados a diferentes objetos representados (parcelas catastrales)



CONSULTA DE DATOS CATASTRALES

ECCIÓN GENERAL DEL CATASTRO DEL MINISTERIO DE HACIENDA Y FUNCIÓN PÚBLICA

DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

Referencia catastral	3008304CG7930N0034FX
Localización	PJ LLETERIES 11 Es:B Pl:03 Pt:02 25700 LA SEU D'URGELL (LLEIDA)
Clase	Urbano
Uso principal	Residencial
Superficie construida (*)	166 m²
Año construcción	1993

PARCELA CATASTRAL

Parcela con varios inmuebles (division horizontal)

Localización	PJ LLETERIES 11 LA SEU D'URGELL (LLEIDA)
Superficie gráfica	1.052 m²
Participación del inmueble	2,810000 %

CONSTRUCCIÓN

Uso principal	Escalera	Planta	Puerta	Superficie m²	Tipo Reforma	Fecha Reforma
VIVIENDA	B	03	02	153		
ELEMENTOS COMUNES				13		

Fuente: IDESCAT; https://www1.sedecatastro.gob.es/CYCBienInmueble/OVCConCiud.aspx?del=25&mun=252&UrbRus=U&RefC=3008304CG7930N0034FX&Apenom=&esBice=&RCBice1=&RCBice2=&DenoBice=.

Así, tenemos que a un objeto dibujado como un polígono que representa una parcela catastral le podemos asignar diferentes atributos, por ejemplo: la superficie construida, el año de construcción, el porcentaje de participación en el inmueble y la localización. A estos atributos los denominamos **características descriptivas de los elementos geométricos**.

La figura 11 muestra la geometría de tipo polígono (el componente espacial) de las parcelas catastrales, a la que se asocian los atributos descritos anteriormente.

Figura 11. Polígonos correspondientes a las parcelas catastrales

Fuente: ICGC; http://betaportal.icgc.cat/wordpress/parcel%C2%B7les_cadastre/.

Al mismo tiempo, los valores de cada atributo no presentan unas pautas de variación más o menos aleatorias, sino que es posible encontrar ciertas regularidades en su variación tanto espacial como temporal conocidas como autocorrelación espacial y autocorrelación temporal (Gutiérrez y Gould, 1994):

1) La autocorrelación espacial es un principio básico en los SIG que establece que los valores temáticos tienden a ser más semejantes entre objetos próximos en el espacio que entre objetos situados lejos unos de otros.

> La primera ley de la geografía, enunciada por W. Tobler (1970), establece que todos los objetos de la superficie terrestre están relacionados entre sí, de modo que las similitudes son más intensas en lugares cercanos que en lugares lejanos.

2) La autocorrelación temporal es un principio básico que se da tanto en los SIG como también en otras disciplinas y que viene a definir un concepto equivalente a la autocorrelación espacial: los datos próximos en el tiempo tienden a ser más semejantes entre sí que los más alejados. De la misma manera que en la variable espacial, los cambios en la variable temporal son graduales a medida que nos alejamos del punto de inicio o de referencia.

2.3.1. Tipo de variables (atributos)

Los atributos que constituyen la información temática de los objetos representados pueden ser de diferente tipo y afectan directamente a la generación de mapas y al tipo de análisis que se utilizará. En otras palabras, el usuario

tiene que conocer el tipo de información con el que trabaja para realizar un análisis o mapa concreto. Las variables pueden ser: discretas y continuas, o fundamentales y derivadas.

1) Variables discretas y continuas

Según los valores que presentan las variables, éstas pueden ser discretas o continuas:

- Variables discretas son aquellas cuyo valor sólo puede ser un número entero.
- Variables continuas son aquellas que presentan un rango de valores comprendido entre dos valores dados; es decir, que se aceptan números decimales.

Ejemplo de variables discretas y continuas

En la figura 10 anterior podéis ver que la variable ***Superficie_Construida*** es continua porque podemos presentar todos los valores que están comprendidos entre, por ejemplo, 150 y 200 m^2 de superficie construida. Podemos decir que tenemos 175 m^2 o bien 189,3 m^2.

Por otra parte, la variable ***Año_Construcción*** diremos que es discreta porque su valor debe ser siempre entero.

Las variables discretas son números enteros y, por lo tanto, requieren menos memoria de almacenamiento en el sistema, mientras que las variables continuas, al ser números decimales, ocupan más memoria en el sistema.

2) Variables fundamentales y derivadas

A diferencia de las variables anteriores, que se distinguían según la naturaleza matemática de sus valores, están las variables fundamentales y derivadas, que se distinguen por la elaboración de los valores obtenidos.

Las variables fundamentales son las generadas directamente por el proceso de medición (Gutiérrez y Gould, 1994), como las que se podrían tomar directamente en el territorio de estudio: *in situ*.

Las variables derivadas son el producto de alguna operación aritmética entre dos o más variables fundamentales (Bosque, 1997).

Ejemplo de variables fundamentales y derivadas

Si volvéis a mirar la tabla 1, podréis ver que la ***Superficie_Construida*** y el ***Año_Construcción*** son variables fundamentales, ya que son mediciones directas, es de-

cir, no son valores obtenidos a partir de otros valores ya previos. En cambio, la variable ***Participación_Inmueble***, por ejemplo, es una variable derivada, porque el valor obtenido ha sido el resultado de dividir la superficie de la parcela entre la superficie de todo el inmueble.

Por ejemplo, al cargar un origen de datos geográficos no es necesario que dispongamos de todos sus atributos, ya que el sistema puede permitirnos derivar información mediante cálculos al vuelo, es decir, que el valor de la variable no está guardado, sino que se calcula cuando se necesita, a partir de las variables fundamentales. Esto es práctico especialmente si los cálculos son rápidos; en caso contrario, por eficiencia, podríamos querer persistir y recuperar también las variables derivadas.

2.3.2. Escala de medición

Las escalas de medición describen la naturaleza de la información, la cualidad que presenta el objeto observado o representado. La información que constituye el componente temático puede medirse en cuatro escalas diferentes: nominal, ordinal, de intervalo y de razón (Stevens, 1946).

A continuación se definen cada una de estas escalas de medición.

1) Escala nominal

La información sobre un objeto se expresa mediante una escala nominal cuando se clasifica mediante **categorías no numéricas**, mutuamente excluyentes, no ordenables. Los valores asociados con este sistema de medición son cualidades, no cantidades. Son valores alfanuméricos, es decir, palabras que nombran alguna cualidad, y de ahí el nombre, “nominal”.

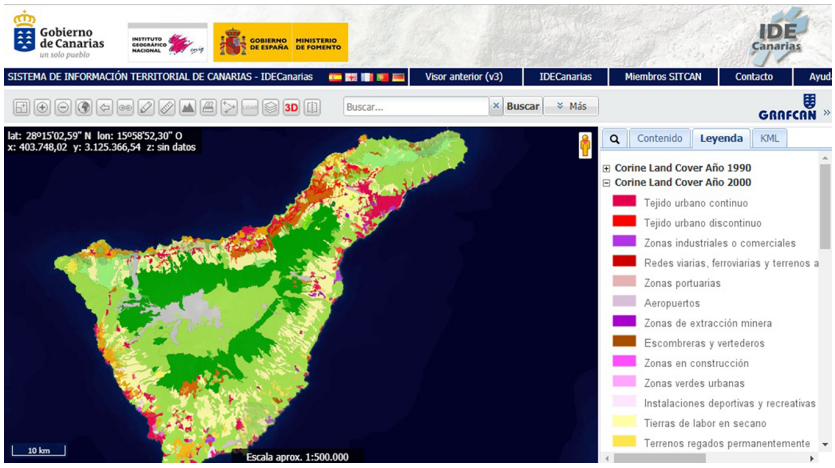
Los valores se miden simplemente por una diferenciación que se podría entender como "igual a/diferente a". Como ejemplo de datos geográficos expresados mediante escala nominal, tenemos: datos de población clasificados según su estado civil, su raza o su lengua materna, o bien la clasificación de los usos del suelo de una zona geográfica, tal como hace el proyecto europeo CORINE Land Cover que se muestra en la figura 12.

Ejemplo de escala nominal

Se ha publicado en IDECanarias el Corine Land Cover, un mapa de ocupación del suelo a escala 1:100.000. El mapa se crea dentro del Programa CORINE (CoORdination of INformation of the Environment), un proyecto experimental para la recopilación, coordinación y homogenización de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad Europea. Dentro de este programa se crea el proyecto **CORINE Land Cover (CLC)**, desde 1995 responsabilidad de la **Agencia Europea del Medio Ambiente**.

Tal como se puede ver en la figura 12, la información temática del proyecto CORINE Land Cover se representa mediante una escala nominal que clasifica los diferentes usos del territorio: tejido urbano, zonas industriales, zonas portuarias, etc., representados como zonas de diferente color.

Figura 12. IDE de Canarias mostrando los datos del proyecto CORINE Land Cover relativos a la caracterización de los usos del suelo



Fuente: http://visor.grafcan.es/visorweb/default.php.

También cabe tener en cuenta que, por razones generalmente informáticas, es frecuente asignar números a los valores nominales (recordad que hemos mencionado que se trabaja con palabras). Estos valores se acostumbran a utilizar internamente para identificar la palabra. Esto puede ser interesante, por ejemplo, si trabajamos con diversos idiomas: así, el número 1 puede significar, según el idioma, "masculino", "masculí", "male", etc. Así, el usuario verá la palabra en su idioma, pero internamente todo estará programado con el valor "1".

2) Escala ordinal

La escala ordinal se diferencia de la nominal en que, además de mantener la diferenciación de "igual a/diferente a", también se establece una jerarquización, un orden entre los diferentes objetos espaciales. Los valores ordinales determinan la posición en la escala, pero no establecen la magnitud o las proporciones relativas entre los diferentes objetos.

Ejemplo de escala ordinal

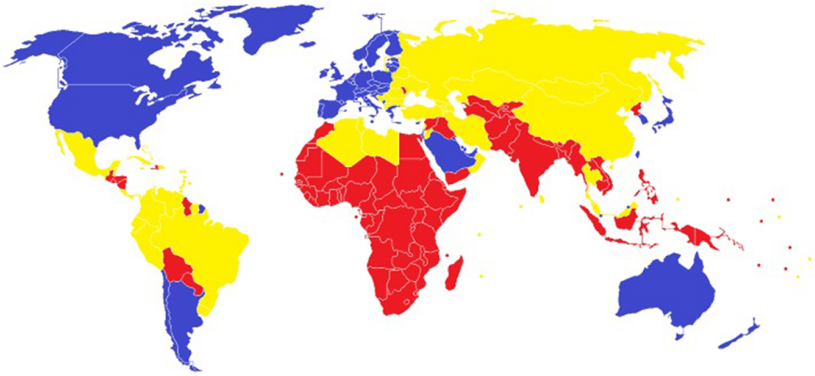
El índice de desarrollo humano (IDH) es un indicador creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) con el fin de determinar el nivel de desarrollo que tienen los países del mundo. Para ello, el IDH tiene en cuenta tres variables: la esperanza de vida al nacer, la educación y la renta per cápita. Los valores del IDH están entre 0 y 1; 0 es la calificación más baja y 1, la más alta.

Según este índice, la PNUD clasifica a los países en tres grandes grupos:

- Países con un ALTO desarrollo humano, con IDH superior a 0,80.
- Países con un desarrollo humano MEDIO, con un IDH entre 0,5 y 0,8.
- Países con un BAJO desarrollo humano, con un IDH menor de 0,5.

La siguiente figura muestra el primer, segundo y tercer mundo según los datos de 2016, en azul, amarillo y rojo respectivamente. No sólo se realiza una clasificación nominal de los datos, sino que se expresan de manera ordenada según la escala ordinal que determina el IDH.

Figura 13. Mapa del desarrollo humano 2016



Fuente: UN Human Development Reports.

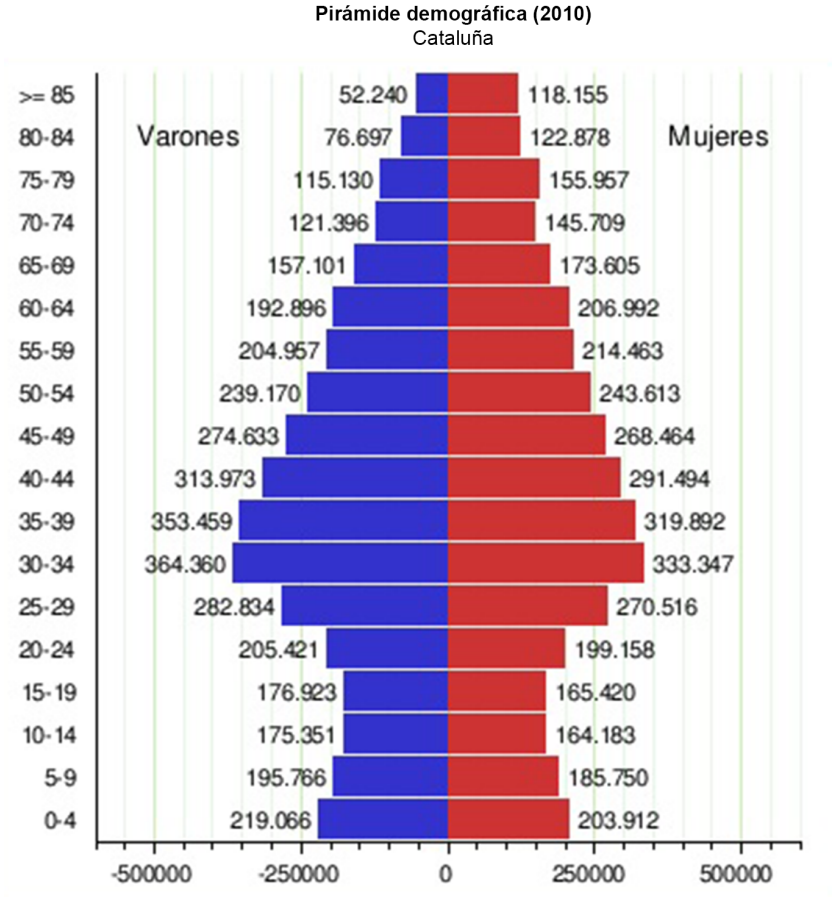
3) Escala de intervalo

La escala de intervalo es la diferencia respecto de un valor que se toma como referencia. En este caso, vemos que además de una diferenciación y jerarquización también ofrece la opción de saber otro valor.

Ejemplo de escala de intervalo

La figura 14 muestra la pirámide demográfica de Cataluña en el año 2010. Expresa los valores en escala de intervalo de manera que, además de saber los valores absolutos de hombres y mujeres por edad, podemos calcular la relación con otros grupos de edad (valores relativos).

Figura 14. Ejemplo de atributos medidos mediante escala de intervalo



Fuente: Estadística aplicada, Carlos Veliz.

4) Escala de razón

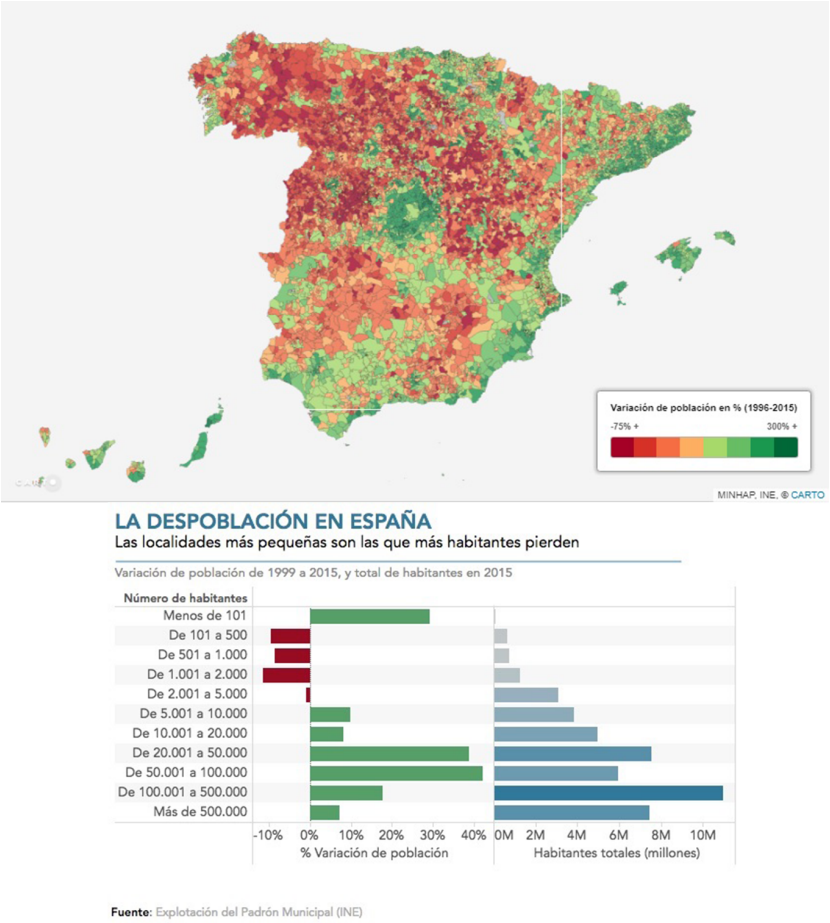
En cuanto a la escala de razón, hay una cierta controversia: podéis encontrar que algunos autores traten la escala de razón (o proporción en este caso) como una variación de la escala de intervalo y, por lo tanto, dentro de esta misma (Gutiérrez y Gould, 1994); o bien podéis encontrar otros autores que la traten como una nueva escala de medida considerada aparte, igual que la nominal, ordinal y de intervalo (Bosque, 1997).

La cuestión es que, independientemente de que se clasifique aparte o no, lo que la diferencia de las demás escalas es que, además de mantener las anteriores relaciones mencionadas: diferenciación (igual/diferente), jerarquización (mayor/menor) y medición, hay que añadir la particularidad de que la medición de dos valores cualesquiera es independiente de la unidad de medida. Esta escala también se conoce como **escala de proporción**.

Ejemplos de medición mediante escala de razón o proporción

La figura 15 muestra la despoblación de las zonas rurales en España durante los últimos años en favor de las capitales. Su expresión como porcentaje es un ejemplo de escala de proporción.

Figura 15. Porcentaje de la variación de población en España de 1996 a 2015



Fuente: Padrón Municipal (INE).

2.4. El componente temporal

Una vez vistos los componentes espacial y temático, ya tenemos tanto la información geográfica como los atributos del objeto. Falta ahora un tercer componente, que sería cómo evoluciona esta información en el tiempo: el componente temporal.

Es importante tener en cuenta que las componentes espacial y temática son imprescindibles para tener un SIG. Sin embargo, la componente temporal puede estar presente o no. Si lo está, permitirá hacer análisis a lo largo del tiempo.

El componente temporal está intrínsecamente relacionado con los componentes espacial y temático. De esta manera, en un periodo de tiempo establecido para una zona territorial concreta, podremos analizar y observar los cambios de las unidades espaciales representadas (componente espacial), así como las nuevas características que presentan estas unidades espaciales (componente temático).

Pongamos, por ejemplo, los usos del suelo de un territorio. Si cogemos como mínimo dos mapas de usos del suelo de una misma zona, pero de diferentes años, podemos observar que los diferentes polígonos de color que forman los mapas han ido cambiando el tamaño y la forma (cambio en el componente espacial), así como también el color (cambio temático).

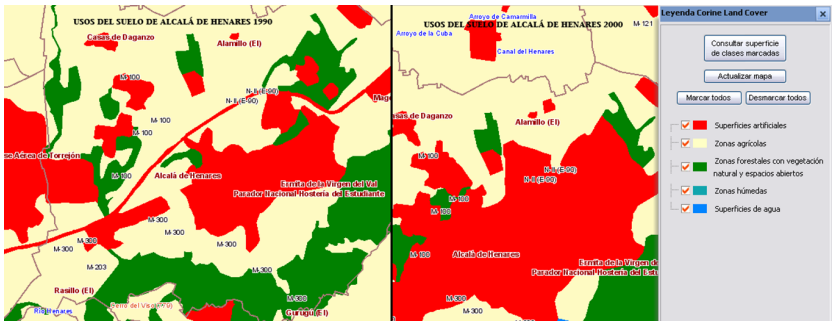
Ejemplos de componente temporal

En la figura 16 podemos observar el caso de los usos del suelo de Alcalá de Henares (Madrid) para los años 1990 y 2000. A simple vista, observamos que el polígono rojo más grande (superficies artificiales) ha crecido notablemente gracias a la anexión o recalificación de zonas agrícolas colindantes. Por lo tanto, viendo este ejemplo podemos afirmar que ha habido un cambio espacial y temático: las superficies artificiales han crecido y esto ha repercutido en la disminución de las zonas agrícolas.

Superficies artificiales

Hacen referencia al suelo urbano, **industrial** e infraestructuras viarias.

Figura 16. Mapa de usos del suelo de los años 1990 y 2000 para la zona de Alcalá de Henares (Madrid)



Fuente: Proyecto CORINE Land Cover; http://land.copernicus.eu/pan-european.

Ahora ya podemos asociar la componente temporal a la idea del cambio. Pero ¿el transcurso del tiempo siempre lleva asociado un cambio espacial y temático?

Supongamos, por ejemplo, una parcela de terreno de un municipio que a lo largo del tiempo no presenta modificaciones espaciales, no se ha ampliado ni disminuido su superficie, pero que ha pasado de ser una zona de matorral a una zona agrícola. No hay cambios espaciales, pero sí temáticos. También se podría encontrar que, al cabo de un periodo largo de tiempo, la parcela hubiera aumentado su área sin cambiar el uso del suelo. Es decir, se hubiera incrementado la zona de matorral y por lo tanto la parcela hubiera cambiado espacial pero no temáticamente.

De todas formas, lo habitual es que, durante un periodo de tiempo, podamos justificar cambios importantes en un territorio y así poder entender los procesos que han tomado parte en el territorio. Esto no es ninguna novedad, ya que el mundo real actual se explica a partir de los procesos espacio-temporales del pasado. Es a lo que se referían los geógrafos clásicos franceses cuando decían que “la historia explica el presente”.

A continuación, vamos a exponer las formas de representación de la componente temporal.

2.4.1. Representación de los procesos espacio-temporales

Una de las formas más comunes de representación de los procesos espacio-temporales se realiza mediante mapas. Las formas más conocidas de representar estos procesos son las siguientes:

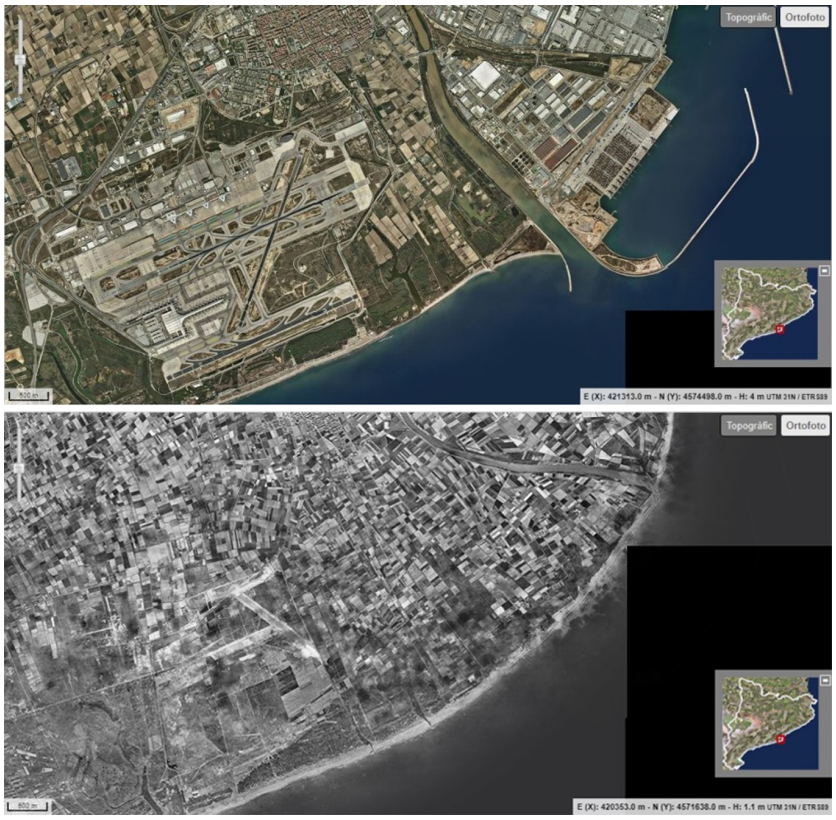
1) Secuencia de mapas o mapas de diferencias temporales: se trata de comparar dos mapas (o más) de la misma área pero en períodos de tiempo distintos También se puede aplicar en otros estudios que no sean de usos del suelo, como por ejemplo: estudios para comparar la precipitación anual entre ciertos años.

Ejemplos de diferencias temporales

En la web del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) podéis encontrar un comparador de ortofotos por años.

Concretamente, la figura 17 muestra una ortofoto actual (imagen superior) a escala 1:2500 del litoral de la ciudad de Barcelona. Podéis compararla con la ortofoto en blanco y negro (imagen inferior) de la misma zona realizada el año 1946. Se puede observar la gran transformación del litoral de la capital catalana con nuevas infraestructuras, como el Puerto de Barcelona y el Aeropuerto de El Prat, o bien el crecimiento de la población de las áreas urbanas cercanas al aeropuerto.

Figura 17. Comparador interactivo del ICGC de ortofotomapas de diferentes años



Fuente: Proyecto CORINE Land Cover; http://www.icc.cat/vissir3/.

De manera similar, la figura 18 muestra el visor del ICGC que permite comprobar los daños del temporal de enero de 2017 en todo el litoral catalán.

Figura 18. Comparativa de la costa antes y después del temporal

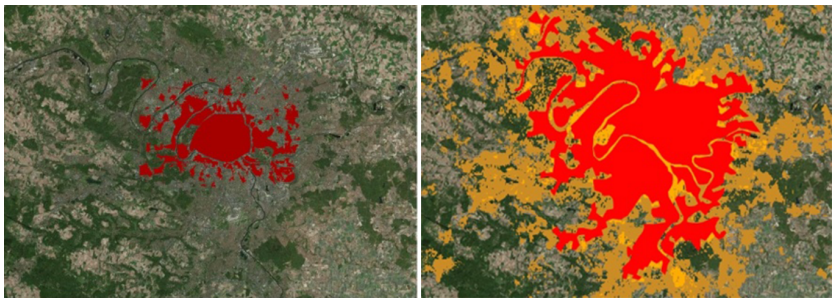
Fuente: ICGC, visor de la evolución de la costa; http://betaportal.icgc.cat/comparador-costa/index.html#11/41.6480/2.7710.

2) Mapa animado: trata de incorporar un número elevado de mapas de una misma área en un periodo de tiempo determinado, y luego proceder a presentarlos de forma sucesiva en pantalla, a modo de "fotogramas" de una animación o vídeo. De esta forma, se pueden visualizar los cambios espaciales de una manera continua en el tiempo.

Ejemplos de mapas animados

Existe gran cantidad de mapas animados que estudian la evolución sobre el territorio de diversas variables. Para citar un ejemplo, podéis leer el artículo "Make Cities Explode in Size With these Interactive Maps", donde podréis ver diferentes mapas interactivos que muestran la evolución durante los últimos cien años del tamaño de grandes ciudades como París. Podéis acceder mediante la URL de la figura 19.

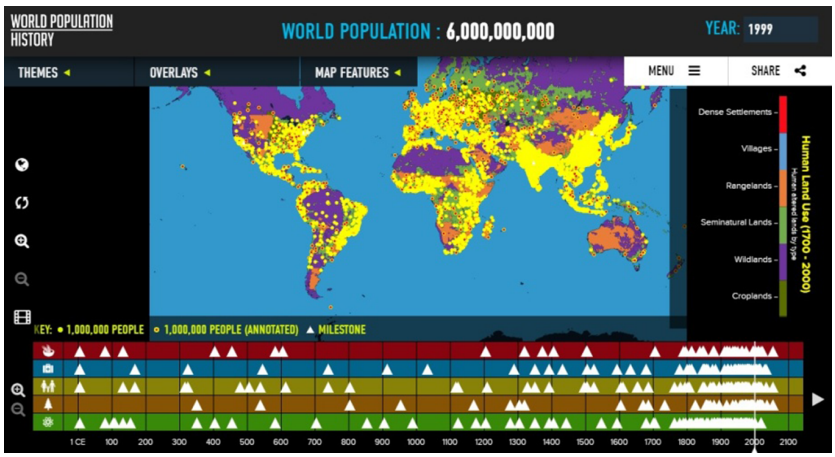
Figura 19. Explorador interactivo de la evolución de la población de la ciudad de París



Fuente: http://www.smithsonianmag.com/science-nature/make-cities-explode-size-these-interactive-maps-180952832/.

También merece la pena visitar http://worldpopulationhistory.org/, que muestra la evolución temporal a escala mundial de temas relacionados con el medio ambiente, la población, los usos del suelo, etc. (podéis ver el aspecto de la web en la figura 20).

Figura 20. Explorador de la evolución de la población de la Tierra



Por último, como ejemplo de un fenómeno creciente en el ámbito de los medios de comunicación, a continuación tenéis un enlace a un diario digital donde se muestra una **animación de unas series temporales de fotografías aéreas** que muestran el cambio urbanístico que supusieron los Juegos Olímpicos de 1992 para la ciudad de Barcelona, en relación con la celebración del vigésimo quinto aniversario de su celebración.

Este tipo de forma de presentar la información está ganando una importancia creciente en los medios de comunicación.

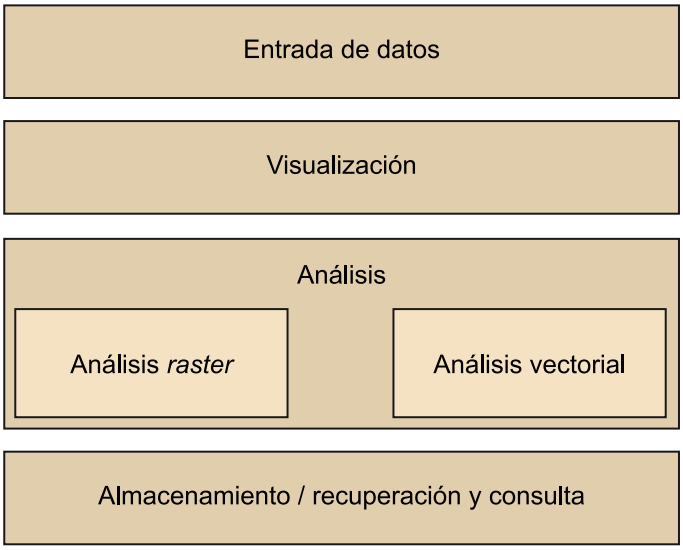
Como ya apuntábamos al principio de este apartado, es muy importante conocer la naturaleza de los datos que maneja un SIG. Los datos geográficos se ocupan de describir y explicar las distribuciones espaciales, es decir, la frecuencia con que algo ocurre sobre el espacio (Martin, 1991).

3. Funciones de los SIG

Dentro de los SIG existe una gran variedad de funciones para el manejo de información geográfica, desde las relativas a la entrada de nuevos datos al sistema, pasando por las funciones de análisis espacial y gestión, hasta la salida de datos mediante publicación o exportación. Y es preciso conocer bien dichas funciones para poder hacer luego un correcto uso de ellas y combinarlas de forma lógica en la resolución de los problemas espaciales, a los que en última instancia se aplica un SIG.

Las funciones de un SIG pueden agruparse en varias categorías, tal y como refleja la figura 21 y veremos a lo largo del capítulo.

Figura 21. Categorías de funciones SIG



De todas las categorías de funciones, hay dos que son especialmente relevantes: el **análisis espacial** y la **visualización de mapas**.

En un SIG de escritorio de índole general, se suele encontrar "de serie" una gran parte de estas funciones, en forma de cajas de herramientas o funciones integradas (por ejemplo, los *toolbox* de los productos ESRI), pero también es habitual encontrar componentes software especializadas para su uso con programación que proporciona sólo un subconjunto de ellas (como una biblioteca o paquete para el análisis de redes).

Como se verá más adelante, algunas de estas funciones son sólo aplicables bajo determinados modelos de datos (por ejemplo, el álgebra de mapas, sobre capas *raster*), por lo que pueden llevar al usuario a optar por determinadas estructuras de datos o bien obligar a procesos de conversión, lo cual deberá tener en cuenta al diseñar sus procedimientos de trabajo.

3.1. Entrada de datos

Las funciones de entrada de datos hacen posible la incorporación de datos geográficos digitales al SIG, los cuales podrán ser luego explotados por sus funciones analíticas. La adquisición de datos es un proceso habitualmente costoso, que debe estar guiado por unos objetivos previos claros para que se realice con la mayor eficiencia, y dentro de un modelo conceptual general que guíe el desarrollo del sistema o aplicación SIG.

Hay dos tipos de datos:

- **Datos primarios**: cuando los produce el propio usuario del sistema para su posterior uso, por ejemplo realizando un muestreo en campo de una variable

- **Datos secundarios**: cuando se obtienen de distribuidores externos, por ejemplo descargando una capa base de un organismo cartográfico oficial.

Es habitual que los datos de entrada posean distintas características en origen, tales como diferentes escalas, proyecciones o formatos, por lo que es habitual realizar tras su adquisición un **proceso de homogeneización** de los datos geográficos, con el fin de configurar un lote de datos más homogéneo y que esto facilite su gestión y análisis posterior.

Proyección cartográfica

Es un sistema de representación gráfica que permite transformar las coordenadas sobre la superficie curva de la Tierra en coordenadas sobre una superficie plana (mapa).

En todo caso, es importante señalar que de las características de los datos de entrada derivará, en gran medida, el valor de los resultados producidos por el SIG. Factores como su escala, exactitud o fecha de actualización condicionarán las explotaciones posibles y la calidad de los análisis.

3.1.1. Digitalización

La digitalización es el proceso de conversión de una información geográfica analógica a un formato digital admitido por el SIG.

Cuando no existían datos geográficos digitales, lo más habitual era realizar una **digitalización manual** de mapas en papel, asistidos por dispositivos como tabletas digitalizadoras. Como resultado se obtenían capas vectoriales, con los puntos dibujados sobre ellas. Otro medio habitual era la digitalización me-

diante **escáner**, en la que el producto eran imágenes que luego había que tratar como capas *raster* o bien vectorizar. Hoy en día estos son procesos en desuso, y sólo se realizan en casos puntuales, como la digitalización de mapas históricos.

Lo que aún es habitual es realizar **digitalización en pantalla**, generalmente mediante el dibujado sobre una ortofoto (por ejemplo, un biólogo experto en vegetación puede, con fotointerpretación, identificar recintos con determinadas formaciones y generar una capa vectorial).

Una utilidad muy habitual en los SIG de escritorio para asistir a la digitalización es el *snapping*, una serie de ayudas al dibujado que facilitan la conexión entre entidades (permitiendo conectar que una línea se conecte a otra sólo por el extremo, y nunca a un punto intermedio). Asimismo, los SIG poseen herramientas para la detección de errores de digitalización a partir de reglas de topología expresadas por los usuarios (una regla sería, por ejemplo, que dos polígonos de tipo parcela nunca se pueden superponer).

3.1.2. GPS

La obtención de datos vectoriales recibidos a partir de GPS y en general GNSS es una práctica muy extendida, aprovechando la ubicuidad de estos sensores en todo tipo de dispositivos (teléfonos móviles de uso cotidiano, dispositivos de captura profesionales, estaciones topográficas, etc.).

Lo más habitual es que los dispositivos almacenen o puedan exportar los datos capturados a ficheros de texto bien formado, tales como GPX, que luego son fácilmente exportables como capas vectoriales a otros formatos SIG y utilizan el sistema de referencia WGS84. GPX (de GPS eXchange Format) es un formato que permite describir puntos, recorridos y rutas en un fichero XML.

3.1.3. Teledetección

La teledetección permite la incorporación de información obtenida remotamente, mediante sensores embarcados en plataformas.

Con la teledetección se obtienen coberturas *raster* u ortoimágenes de fácil uso con los SIG, que los propios productores ofrecen tras recibir en tierra y procesar convenientemente los datos brutos.

Algunas de las fuentes más relevantes son los **satélites** puestos en órbita por la NASA norteamericana (por ejemplo, las series Landsat1) y la agencia europea ESA (satélites Sentinel) con un objetivo de monitorización global. Muchos de estos satélites montan los denominados **sensores pasivos**, que permiten capturar información digital en varias bandas del espectro electromagnético (no sólo el espectro visible –tomando fotografía común–, sino también otras

porciones como el infrarrojo, muy interesantes por ejemplo para el estudio de la temperatura del mar). A los sensores de este tipo, también se añaden en ocasiones **sensores activos** como los RADAR, para analizar por ejemplo la estructura de la atmósfera, o más recientemente, los LIDAR, que permiten capturar información muy detallada del relieve del terreno y suelen montarse en **aviones**.

De forma más reciente, se ha extendido mucho el uso de **drones**, una forma más económica y flexible de capturar datos geográficos de alta resolución, cuando la superficie de interés es más reducida.

3.1.4. Información ciudadana

Tradicionalmente, sólo las corporaciones públicas designadas han sido responsables de crear información geográfica (servicios cartográficos, civiles o militares, institutos de investigación…).

Sin embargo, en los últimos años los ciudadanos se han incorporado masivamente no sólo al consumo sino a la creación de información geográfica digital, como auténticos "sensores humanos", dentro de la denominada **neogeografía**. Desde la aparición de **Google Maps** en 2005, y en el marco general de la web 2.0, la neogeografía ha supuesto una auténtica revolución de la información geográfica y ha puesto la información geográfica y sus herramientas de creación y consumo masivo en la mano del ciudadano.

Mediante plataformas colaborativas y abiertas, de las que **OpenStreetMap** (OSM) es el mejor ejemplo, se crean, validan y publican libremente datos geográficos mundiales. Los datos con este origen, generados mediante trazas GPS o digitalización sobre ortofotos libres, tienen una calidad contrastada y un ciclo de actualización notable.

Los datos vectoriales de OSM pueden descargarse fácilmente, para una zona de interés, y trabajar con ellos en un SIG; de hecho, algunos como QGIS disponen de extensiones específicas para este fin. Asimismo, es frecuente el uso de mapas base en línea creados mediante el renderizado con distintos estilos de esta información de base (por ejemplo, los servicios de mapa teselados como **Positron**, ofrecido por la empresa Carto).

Otro aspecto muy notable de OSM es su aplicación en casos de emergencias, tales como catástrofes naturales o crisis, como inundaciones o terremotos, entre otros. En este caso juegan un papel muy importante iniciativas como las del **Humanitarian OpenStreetMap Team**. Los mapas actualizados, editados

en línea por miles de voluntarios, permiten una mejor gestión en el territorio para restaurar las vías de comunicación tras una catástrofe, localizar zonas pobladas, etc.

3.2. Almacenamiento y recuperación de información geográfica

La información geográfica obtenida mediante los procesos de entrada de datos, o bien derivada de procesos posteriores de análisis, se almacena habitualmente en un medio digital persistente. Una vez almacenada, se plantean diversos retos para gestionar esa información geográfica, que tienen que ver con cuestiones diversas como reducir su espacio en disco, controlar su acceso o permitir consultas y extracciones rápidas.

Atendiendo a la forma de almacenar y gestionar los datos, pueden distinguirse dos grandes categorías: **ficheros** y **bases de datos geográficas**.

3.2.1. Ficheros SIG

Los ficheros presentan la primera fórmula y probablemente la más extendida aún hoy en día. Desde los orígenes de los SIG, el uso de ficheros, binarios o de texto plano, ha permitido almacenar y compartir información geográfica de forma sencilla. Existe una gran variedad de ficheros, por lo que es frecuente la necesidad de aplicar herramientas de conversión entre formatos y así poder adaptarlos en cada momento al software SIG concreto que se maneje.

1) Vector

El formato aún más extendido, a pesar de su antigüedad y limitaciones, es **ESRI Shapefile**. Prácticamente cualquier SIG permite su visualización y/o edición e incluye las componentes espacial y temática de una forma bastante práctica para el acceso, incluyendo la posibilidad de usar un índice espacial.

De forma más reciente, y por su facilidad para el manejo en aplicaciones SIG en la web, se ha extendido el formato **GeoJSON** (texto plano y fácilmente legible, derivado de JavaScript JSON) y el **TopoJSON** (una formulación mejorada que permite gestionar topología y resulta en ficheros de menor tamaño). Los ficheros de otro tipo, como los procedentes de software CAD (.DXF,.DWG), o los muy habituales ficheros .CSV con información geográfica (por ejemplo, con longitud, latitud y un valor) suelen convertirse a otros formatos, para así superar sus limitaciones y poder ser manejados correctamente. Otro formato bastante extendido es KML/KMZ, un contenedor de datos geográficos impulsado por Google que permite incluir datos vectoriales e imágenes georreferenciadas y que, junto a los datos, permite guardar estilos.

2) *Raster*

Es habitual usar ficheros genéricos de tipo imagen, acompañados con un fichero que permita su georreferenciación (ficheros **World File**). Algunos formatos habituales son **.jpg**, **.tif**, **.ecw** (para imágenes aéreas grandes) o **.asc** (ESRI ASCII grid).

En la práctica, el formato GeoTIFF suele ofrecer una opción flexible y práctica, al poder manejar varias bandas, incluir embebida la referencia espacial, identificar valores nulos y permitir el almacenamiento de valores numéricos enteros o flotantes.

Ante el habitual tamaño grande que alcanzan estos ficheros *raster*, suelen usarse mecanismos de compresión (por ejemplo, LZW) y vistas simplificadas para mejorar la velocidad de carga (**pirámides *raster***).

3.2.2. Bases de datos geográficas

Los ficheros pueden ser prácticos, pero su gestión presenta habitualmente dificultades, especialmente cuando su número en un proyecto crece mucho o bien lo hace el número de usuarios de los mismos.

Para resolver estos problemas, no sólo en el ámbito de los SIG, sino en el ámbito general del manejo de información digital, se han desarrollado desde hace tiempo las tecnologías de bases de datos (BB.DD.).

Las BB.DD. aplicadas a la información geográfica permiten garantizar la integridad de los datos ante la edición, representar mejor las relaciones entre objetos espaciales, incluir disparadores automáticos de acciones ante determinadas operaciones o gestionar de forma más adecuada los permisos de acceso.

Tipos de bases de datos espaciales

Se pueden distinguir BB.DD. personales o corporativas.

Las **bases de datos personales** se caracterizan por estar formadas por un solo fichero o un conjunto reducido y no precisar la instalación de un servicio gestor de bases de datos. Pertenecen a esta categoría bases de datos simples como la **Geodatabase** de ESRI o **SpatiaLite** (que trabaja sobre SQLite), las cuales permiten un mayor grado de organización y control de la información que los ficheros.

Cuando las necesidades son mayores, por volumen o complejidad de la gestión, se suele dar el paso a las **bases de datos corporativas**. Bajo esta denominación se incluyen BB.DD. de uso general (por ejemplo **Oracle**, **SQL Server** o **Postgre**), que tienen extensiones para el manejo de información geográfica y permiten realizar consultas SQL con operadores y funciones espaciales (por

ejemplo, PostGIS bajo Postgre). Estas BB.DD., manejadas desde los denominados SGBD (sistemas gestores de bases de datos) proporcionan de serie mejor eficiencia, medios para realizar copias de seguridad, auditoría, gestión de accesos concurrentes, etc.

En un primer término, en estas BB.DD. sólo se podían integrar datos vectoriales, pero de forma más reciente se han abierto al manejo de capas *raster* (por ejemplo, con el tipo de datos nativo RASTER desde PostGIS 2.0).

Las bases de datos relacionales o relacionales extendidas/orientadas a objetos, apoyadas en el lenguaje SQL, han dominado en gran medida el panorama de almacenamiento en los últimos años, pero otros modelos han tomado impulso más recientemente, como las bases de datos orientadas a documentos (por ejemplo, **MongoDB**) o las orientadas a grafos (por ejemplo, **Neo4j**) y en ellas también han surgido métodos para introducir y consultar información geográfica.

3.2.3. Recuperación de información geográfica

La recuperación de capas con información geográfica se produce en el caso de ficheros mediante la navegación directa en disco, habitualmente asistida mediante aplicaciones de exploración (tales como **ArcCatalog** de ESRI o **QGIS Explorer**). Estas permiten previsualizar el contenido de los ficheros, sus metadatos si los tuvieran, y realizar labores sencillas de gestión como renombrar, copiar, añadir un campo, etc.

En el caso de las bases de datos, el acceso puede producirse igualmente desde los exploradores SIG indicados, pero también es habitual que se usen herramientas más genéricas, como los propios programas de administración de bases de datos (por ejemplo, **pgAdmin** para acceder a datos en PostGIS). En estas conexiones, el usuario debe proveer una identidad, la cual condicionará la información y las operaciones disponibles para cada capa dentro del SIG.

Una tercera opción, que en realidad aporta una abstracción sobre el origen de los datos, es el uso de un servicio de acceso a datos. Mediante el uso de alguno de éstos, por ejemplo, un servicio WFS (**Web Feature Service**), se puede acceder a información vectorial remota, sin conocer si los mecanismos de persistencia en el servidor accedido son ficheros o bases de datos.

Una vez localizadas las capas vectoriales o *raster*, en los orígenes de datos oportunos, se procede a su carga para la visualización o análisis dentro del SIG, ya sea en su totalidad o mediante una vista reducida de los datos creada con **consultas**.

Consultas a bases de datos

La información geográfica almacenada en un SIG se consulta con frecuencia, para saber dónde se cumple determinada condición (**búsqueda temática**) o para saber qué hay en una ubicación concreta (**búsqueda espacial**).

1) Búsqueda temática

Las búsquedas temáticas se basan en establecer una condición aritmética o lógica para filtrar los objetos de interés. Por ejemplo, en una capa de secciones censales, ¿cuál es la que tiene por identidad el código 1403?, o en un mapa urbanístico de un municipio, ¿dónde hay suelo urbanizable?

Frecuentemente, lo que se considera en las consultas son valores cuantitativos asociados a un registro, mediante operadores de condición que se evalúan para cada caso en cierto o falso. Por ejemplo, ¿qué secciones censales tienen > 2.000 habitantes?

2) Búsqueda espacial

La **identificación del valor** bajo unas coordenadas, sea mediante un clic en un objeto vectorial o en un píxel, es la forma más básica y utilizada de consulta espacial (por ejemplo, en un mapa geológico, ¿qué categoría litológica hay en unas determinadas *x*, *y*?).

De la misma forma, se puede realizar la selección de objetos dentro o tocando formas geométricas que se definan (línea, círculo, polígono…). Para búsquedas espaciales más complejas, se acude normalmente a su definición en modo texto.

> Todos los SIG, se utilice o no un SGBD para la persistencia de datos, ofrecen mecanismos para llevar a cabo consultas espaciales.

En dichas consultas se pueden usar operadores y funciones espaciales como los siguientes:

a) Operadores: los más habituales, recogidos en la especificación Simple Feature Access de OGC, son: Intersects, Equals, Disjoint, Touches, Within, Overlaps, Crosses, Contains. Son booleanos (devuelven cierto o falso) y su descripción se recoge en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de operadores espaciales

Operadores	Descripción
Intersects	*Intersecta* Las geometrías (a) y (b) intersectan si comparten una porción espacial.

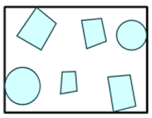
Fuente: adaptado de Dimensionally Extended nine-Intersection Model (DE-9IM).

Operadores	Descripción
Equals	*Igual a* La geometría (a) es idéntica a la geometría (b)
Disjoint	*Separada de* El opuesto a *Intersects*. Las geometrías (a) y (b) no tienen ningún punto en común
Touches	*Toca* La geometría (a) tiene al menos un punto en común en los bordes, pero no puntos interiores.
Within	*Dentro de* La geometría (a) se encuentra en el interior de la geometría (b)
Overlaps	*Se superpone con* Las geometrías (a) y la (b) son del mismo tipo y comparten alguna porción, pero no la totalidad.
Crosses	*Se cruza con* Las geometrías (a) y (b) tienen algún punto interior en común, pero no todos. La intersección que se produce entre ambas tiene una dimensión menor que al menos una de ellas: por ejemplo, si una línea (a) cruza un polígono (b), la intersección es una línea, que posee una dimensión menos que el polígono (b).
Contains	*Contiene* La geometría (a) contiene a la (b) si ésta se encuentra completamente en su interior.

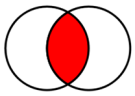
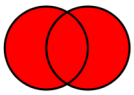
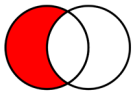
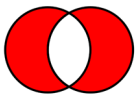
Fuente: adaptado de Dimensionally Extended nine-Intersection Model (DE-9IM).

b) Funciones espaciales: devuelven un nuevo valor fruto del cálculo, habitualmente una nueva geometría. Las más extendidas son: Centroid, Bounding Box, Buffer, Convex Hull, Intersection, Union, Difference, Symmetrical Difference, Distance (ver tabla 2). Estas consultas permiten también establecer relaciones de tipo JOIN espacial, entre registros de distintas tablas.

Tabla 2. Tabla de funciones espaciales más comunes

Funciones	Descripción
Centroid	*Centroide* Centro geométrico de una geometría. Ejemplo de Centroide para un polígono:
Bounding Box	*Caja contenedora* Rectángulo que contiene los límites de la geometría. Ejemplo de caja contenedora, en negro, para un conjunto de 6 polígonos: 

Fuente: adaptado de Postgis Reference

Funciones	Descripción
Buffer	*Búfer* Área que incluye todos los puntos a una determinada distancia de una geometría. Ejemplo de búfer sobre un punto:
Convex Hull	*Envolvente convexa* La mínima geometría convexa que contiene a la/s geometría/s indicada/s. Ejemplo de envolvente, en azul, para un conjunto de 4 puntos y 2 líneas:
Intersection	*Intersección* Porción de geometría compartida entre las geometrías suministradas como parámetros. Ejemplo de intersección, en rojo, entre 2 geometrías circulares: 
Union	*Unión* La geometría que representa el conjunto de todos los puntos de las geometrías de entrada. Ejemplo de unión entre 2 geometrías circulares: 
Difference	*Diferencia* Dadas dos geometrías (a) y (b) retorna la parte de (a) que no intersecta con (b). Ejemplo de diferencia entre 2 geometrías circulares, (a) a la izquierda y (b) a la derecha: 
Symmetrical Difference	*Diferencia simétrica* La unión menos la intersección (todo lo que no está en la intersección). Ejemplo de diferencia simétrica entre 2 geometrías circulares: 
Distance	*Distancia* El valor numérico con la distancia entre geometrías, según el método que se elija (habitualmente la distancia cartesiana o la distancia geodésica).

Fuente: adaptado de Postgis Reference

Es importante señalar que las componentes temática y espacial de una consulta pueden combinarse, por lo que mediante consulta pueden llevarse a cabo procesos encadenados de recuperación de información. En sistemas de tipo inventario este tipo de consultas combinadas constituyen el grueso de las operaciones que se llevan a cabo (por ejemplo, en aplicaciones SIG catastrales). En determinadas bases de datos espaciales, como PostGIS, la disponibilidad de utilizar funciones espaciales avanzadas permite combinar operaciones de consulta y análisis espacial en una misma sentencia SQL.

3.3. Visualización de información geográfica

La visualización es probablemente el grupo de funciones más explotado en los SIG. Consiste en el proceso de transformación de los datos geográficos en imágenes, sea para mostrarlas por pantalla o para plasmarlas después en otros medios como el papel. En estas visualizaciones geográficas, el protagonista principal es el mapa.

En la actual sociedad de la información, los mapas digitales constituyen una gran herramienta de comunicación. Un mapa digital bien ejecutado puede transmitir mucha información sobre un determinado tema y hacerlo de forma expresiva y fácilmente asimilable.

En este apartado se recogen los principios básicos que rigen la representación de datos en los denominados mapas temáticos.

3.3.1. Variables visuales

La representación en un mapa de capas vectoriales o *raster* proporciona muchas veces el *feedback* más directo sobre la naturaleza de los datos geográficos, tanto su distribución espacial como sus atributos temáticos, y es en muchas ocasiones la mejor forma para mostrar un análisis.

Lectura complementaria

J. Bertin (1967). *Sémiologie Graphique*. París: Editions Gauthier-Villars.

Tabla 3. Las seis variables visuales categorizadas por Bertin y sus posibles modificaciones en entornos estáticos y dinámicos

Variables gráficas (Bertin, 1967)	Visualizaciones estáticas	Visualizaciones dinámicas
Dos dimensiones del plano		
Tamaño		
Intensidad		
Grano		
Color		
Orientación		
Forma		

Fuente: Hruby y otros (2015).

Para codificar los datos en el mapa, el usuario tiene a su disposición un lenguaje formado por un conjunto de **variables visuales**. Dichas variables fueron tipificadas en seis categorías por Bertin, tal y como refleja tabla 3 anterior, y es labor del usuario conocer y seleccionar las más útiles para aplicar en cada caso.

En términos generales, color, forma y textura (*color hue / shape / texture*) son más adecuadas para mostrar **variables cualitativas** (como los distintos usos del suelo en un municipio), mientras que para **variables cuantitativas** son más adecuadas la intensidad del color y el tamaño (*color value / size*), por ejemplo, para representar la densidad de población en una región o el volumen de exportaciones por país en un mapa del mundo.

Las variables visuales están más orientadas a la representación de capas vectoriales, las más clásicas en el ámbito cartográfico. Sin embargo, algunos de estos principios pueden aplicarse igualmente en la presentación de capas *raster*, donde el valor temático de cada píxel puede codificarse mediante el uso de las variables del color (tono, valor e intensidad).

3.3.2. Mapas temáticos

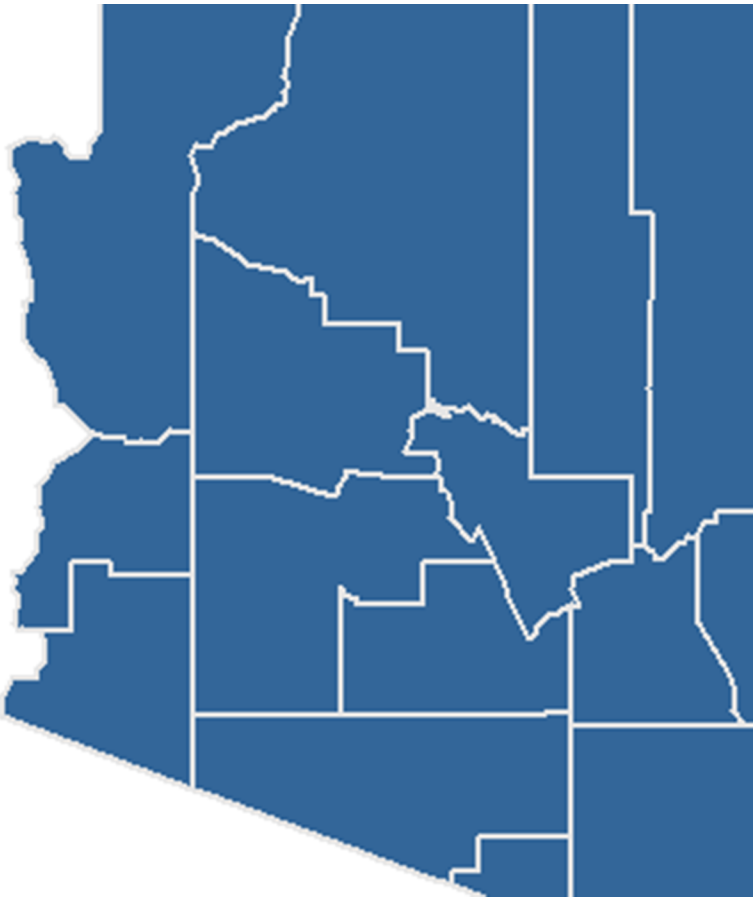
Los mapas temáticos se centran en representar **una variable** espacial concreta sobre el territorio, como por ejemplo la distribución de la temperatura o los tipos de suelo de una región.

Lo más habitual, a la hora de crear un mapa temático, es plasmar la capa de interés sobre un **mapa base topográfico**, que le provea de referencia o contexto espacial suficiente sin enmascarar su presencia, o sobre un **mapa de imagen** (por ejemplo, una ortofoto a color de la zona).

Mapas de símbolo único y símbolo múltiple

Una primera y frecuente forma de representación es asignar a todos los elementos de una capa un **símbolo único** (por ejemplo, una capa de ciudades con círculos rojos para todas ellas, una capa de líneas con ríos de color azul o todos los polígonos industriales de una ciudad con color gris). De la misma forma, una capa *raster* puede representarse con un solo color para todas las celdas, por ejemplo, para mostrar la extensión de una inundación costera calculada por un modelo. En la figura 22 se muestra una capa de condados en Estados Unidos con relleno en azul y borde blanco.

Figura 22. Mapa símbolo único para representar condados

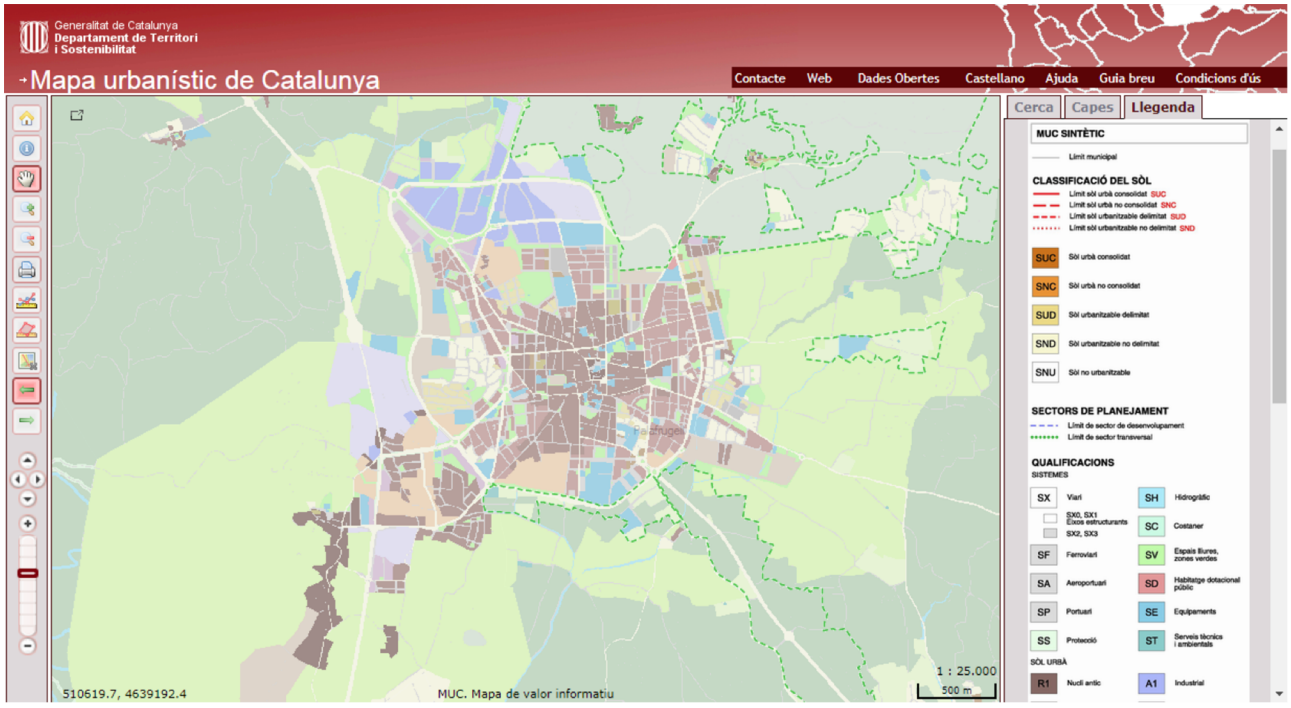


Fuente: http://www.net-eng.it/prodotti/mapviewer/maps.html.

Si lo que se desea es reflejar categorías dentro de los fenómenos, es conveniente utilizar **varios símbolos o tonos de color** (por ejemplo, un círculo con halo para señalar una capital regional y un cuadrado para la capital del país o un relleno de color rojo para suelo urbano, verde para suelo protegido y naranja para suelo urbanizable). Por otro lado, si el número de registros es reducido y lo que se quiere reflejar es sólo su identidad, puede usarse la clave de cada

uno y codificarla con un color o símbolo distinto y personalizado. En la figura 23 se usan varios colores e iconos para representar los usos del suelo (bosques, campos de cultivo, reservas naturales, zona urbana, etc.).

Figura 23. Mapa urbanístico de Cataluña



Fuente: http://dtes.gencat.cat/muc-visor/AppJava/home.do.

Las técnicas previas sirven para visualizar la distribución espacial de los fenómenos y sus categorías, pero no aplican si se desea mostrar una componente temática cuantitativa (por ejemplo, la población de cada ciudad, el número de empresas en cada polígono industrial o la velocidad de arrastre del agua). Para ésta y otras labores especializadas existen otros tipos de mapas temáticos; a continuación, se recogen sus tipos más extendidos.

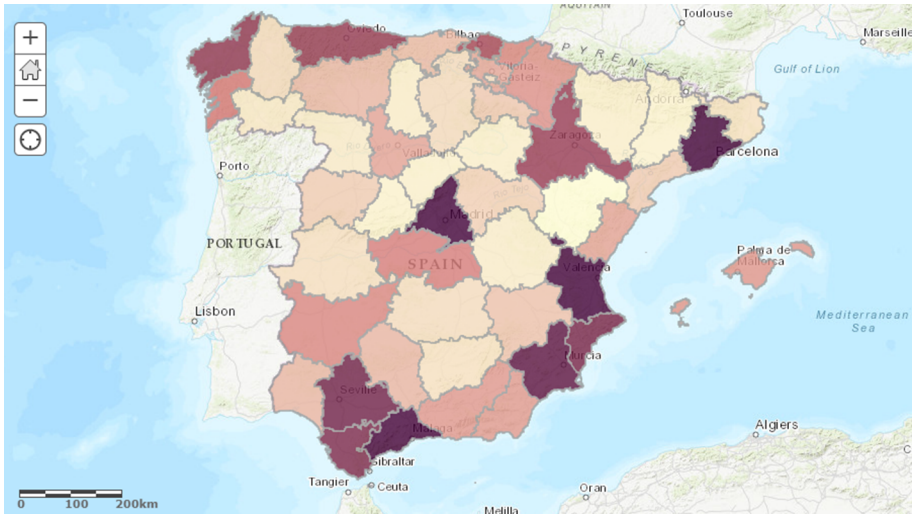
Mapas de coropletas

Los mapas de coropletas se basan en el uso de una lista graduada de colores o tramas, donde cada uno de ellos representa una **categoría de valores** para una variable cuantitativa. El número de clases y los intervalos de corte entre cada una pueden determinarse mediante diversos métodos (igual tamaño, igual número de elementos, por desviaciones típicas, por intervalos naturales / *Jenks*...). Si el número de intervalos es pequeño, se identificarán claramente las categorías. Si por contra el número es elevado, se observarán mejor las diferencias progresivas o gradientes, a costa de difuminarse la identidad visual de cada intervalo.

Los mapas de coropletas se utilizan muy habitualmente para la representación de variables estadísticas (la renta media, la tasa de paro la densidad de población...), para unas entidades administrativas concretas (municipios, provincias, secciones censales...). No obstante, pueden ser igualmente aplicados so-

bre unidades que dividan el territorio en unidades arbitrarias, como celdas regulares (cuadrados, hexágonos…). Si se aplica este tipo de gradaciones de color a capas *raster*, estamos ante lo que habitualmente se denominan *colormaps*.

Figura 24. Mapa de coropletas para representar la densidad de población



Fuente: https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1&layers=d2de3f9343e74810ab04d06ad9dd9ab9.

Las rampas de colores y variaciones en tramas disponibles en los distintos programas SIG son habitualmente suficientes para suplir las necesidades generales del usuario, aunque también pueden componerse de forma personalizada.

> Muchas de las rampas de colores y variaciones disponibles en un SIG se basan en las paletas incluidas en el proyecto **ColorBrewer**.

Mapas de símbolos proporcionales

Los mapas de símbolos proporcionales se basan en el uso del tamaño como clave para codificar un valor de una variable cuantitativa. Por ejemplo, en la figura 25, el tamaño codifica el diámetro en millas de los mayores cráteres del mundo. El símbolo seleccionado es del mismo tipo para todos los elementos (habitualmente una forma sencilla, como un círculo o un cuadrado), y varía sólo su dimensión.

Figura 25. Mapa de símbolos graduados, representando los mayores cráteres del mundo

Fuente: Universidad de Penn State; https://www.e-education.psu.edu/geog486/node/1869.

Son mapas muy habituales para representar cantidades asociadas a un punto (por ejemplo, población en cada ciudad), aunque pueden aplicarse también a capas lineales (por ejemplo, una red hidrográfica en la que se usa el grosor de la línea para indicar el orden jerárquico de cada tramo). En el caso de capas poligonales, es frecuente que la información se transfiera al centroide del polígono y así poder acomodarse a esta forma de representación.

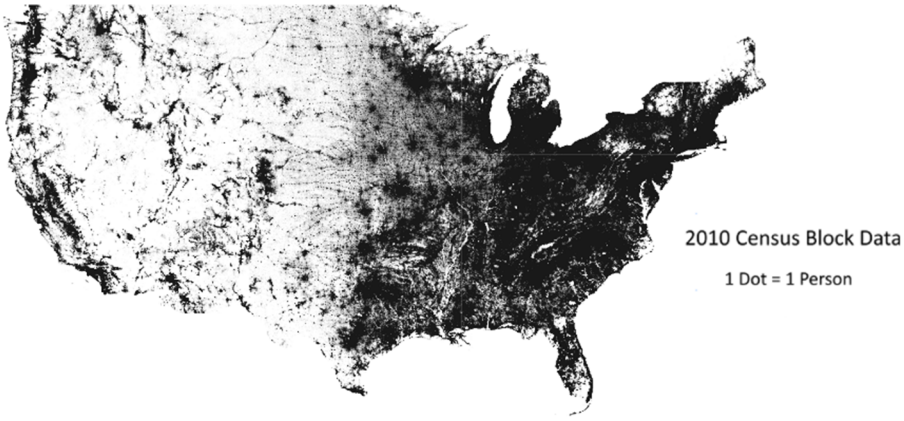
Una variedad de estos mapas son los denominados **mapas con *clustering*** o **concentración de elementos puntuales**. En ellos, aparecen mapas de puntos graduados, y cada uno es indicador o aglutinador de la presencia próxima de varios registros. Es una técnica frecuente en mapas interactivos, en los que el nivel de zoom determina cuánto se concentran los elementos, y suele ir acompañada de un etiquetado en cada punto del número de individuos que contiene.

Mapas de densidad de puntos

Para estos mapas, el elemento representativo es el punto, pero en lugar de cambiar su tamaño para vincularlo a la variable deseada, lo que se realiza es aumentar su número conforme más crece dicha variable.

Es un buen tipo de mapa para presentar variables discretas como población, número de casos de una enfermedad, cabezas de ganado, etc. dentro de un ámbito territorial de polígonos, en los que existe una distribución irregular. Para acomodar su densidad al mapa, cada punto puede representar una unidad de la variable o una agrupación mayor (por ejemplo, en un mapa de población, cada punto podría indicar 100 habitantes). En el caso de la figura 26, se usa este tipo de mapa temático para representar la población en Estados Unidos, y gracias a él se aprecia netamente la disimetría demográfica, con un Este densamente poblado frente a un Oeste en el que sólo destacan las urbes de la costa del Pacífico.

Figura 26. Mapa de puntos con la población de Estados Unidos



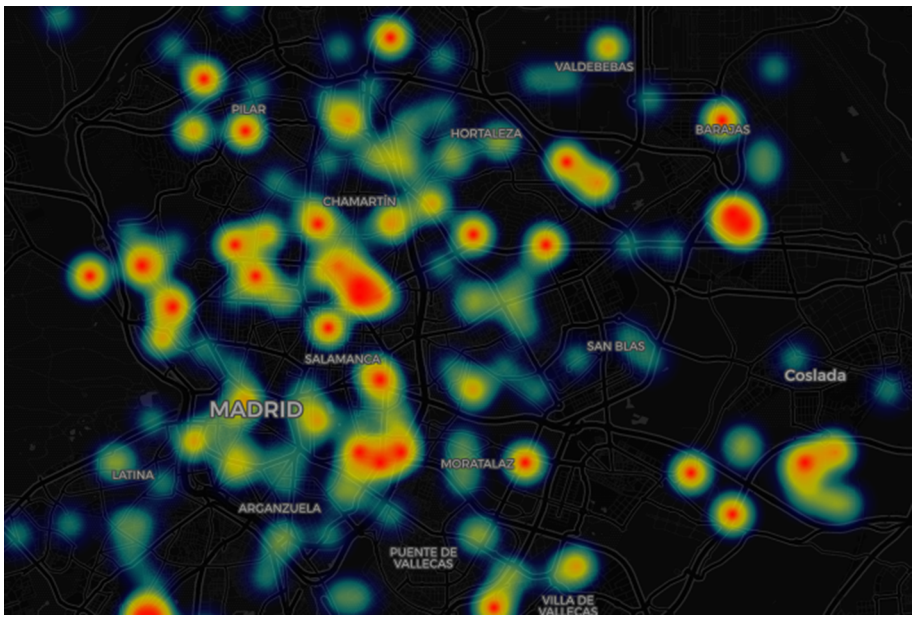
Fuente: Universidad de Virginia; http://demographics.virginia.edu/DotMap/. Existe una versión en línea, interactiva, en la que se puede mostrar también la composición étnica de la población.

Por lo general, la distribución de puntos se realiza de forma homogénea por todo el polígono, pero es importante reseñar que esto puede generar en ocasiones problemas de interpretación (por ejemplo, puntos representando personas en una porción montañosa de una provincia que está deshabitada).

Mapas de calor o *heatmaps*

Los ***heatmaps*** son representaciones que muestran la concentración de un fenómeno en el territorio. En este tipo de mapas se utilizan colores intensos y cálidos donde el valor a representar o la concentración es más elevada (las **zonas de calor**). Se suelen aplicar a capas puntuales en las que el elevado volumen de registros dificulta, por estar muy próximos o incluso solaparse, el analizar patrones de distribución.

Figura 27. Mapa de calor que muestra multas en Madrid (España)



Fuente: *Directions Magazine.*

En la figura 27 se aplica esta modalidad de mapa para mostrar cómo se distribuyeron las multas por exceso de velocidad en el municipio de Madrid entre febrero de 2015 y enero de 2016; destacan algunos puntos donde los conductores infringen reiteradamente los límites, que suelen coincidir con accesos como las avenidas de América, de Andalucía y del Mediterráneo o amplias avenidas como el Paseo de la Castellana o la calle del Cardenal Herrera Oria.

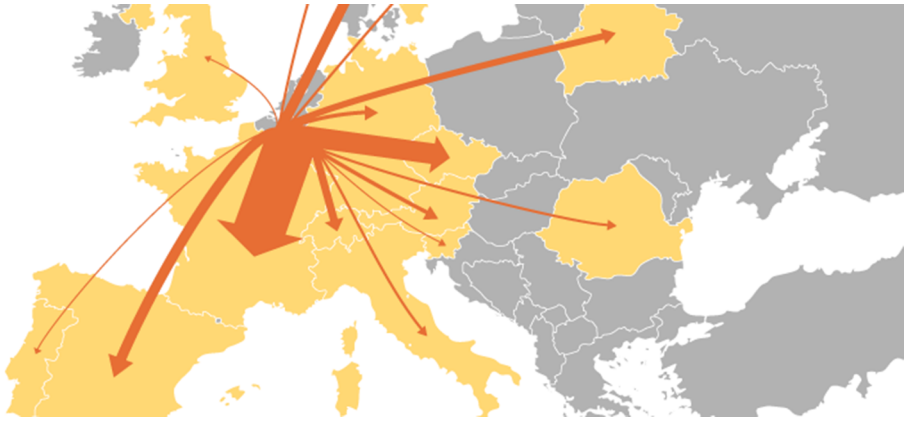
Es una técnica apropiada cuando se quiere mostrar elementos de una categoría muy numerosos, tales como el número de tuits con un determinado *hashtag* durante un periodo.

Es factible asociar a la selección del color un componente temático de cada punto (por ejemplo, en un mapa de calor de terremotos, su intensidad en escala Richter), aunque es más habitual prescindir de esta opción y usar el *heatmap* como simple representación de la concentración espacial de elementos.

Mapas de flujos

En el mapa de flujos, se muestran trazos que van de un origen a un destino mediante líneas con grosor proporcional al valor de la variable. Por esta razón, son mapas adecuados para representar movimientos, tales como flujos migratorios, importaciones y exportaciones de mercancías, capitales, etc.

Figura 28. Mapa de flujos



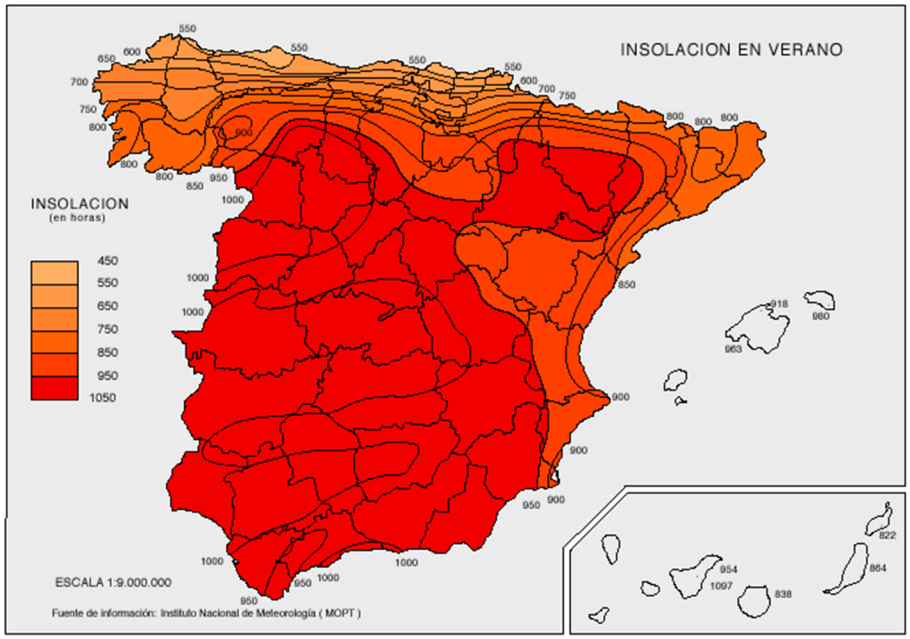
Fuente: The Data Visualisation Catalogue.

En la figura 28 se observa un mapa cuyo objetivo es reflejar flujos de salida desde Bélgica a otros países europeos; el receptor mayor es Francia, y después le sigue la República Checa y, aunque la fuente no la identifica, bien podrá representar una variable como por ejemplo exportación de bienes industriales.

Mapas de isolíneas

Las isolíneas son líneas curvas que conectan puntos con el mismo valor. A partir de un *raster* que represente la variable cuantitativa de interés, ciertos módulos de SIG generan las isolíneas, en forma de una nueva capa vectorial, con el intervalo de separación deseado (por ejemplo, curvas de nivel cada 100 metros, sobre un *raster* con el modelo digital de elevaciones de una región).

Figura 29. Mapa de isolíneas mostrando las horas de insolación en la Península Ibérica



Fuente: Universidad Politécnica de Madrid; http://redgeomatica.rediris.es/carto2/arbolT/arbolT.htm.

De forma frecuente, las isolíneas se combinan con una representación en forma de mapa de color de la misma variable, lo que refuerza su capacidad expresiva (doble codificación cartográfica). Así sucede en la figura 29, en la que se reflejan las horas de sol en la Península Ibérica y los colores rojos intensos se usan donde la isolíneas indican valores más altos.

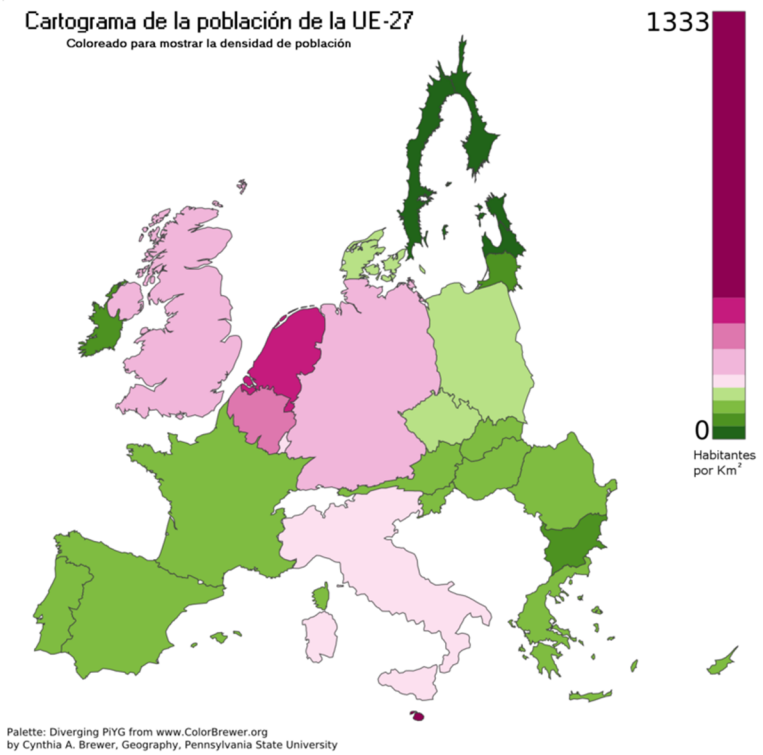
Cartogramas

Los cartogramas no son mapas al uso. Se basan en la codificación de la variable mediante la distorsión de la propia forma de los polígonos en la capa de partida. Polígonos con mayor tamaño significan valores más altos de la variable, y a la inversa.

Es necesario, para que sean significativos, que la distorsión no llegue a eliminar la identificación mental en el lector entre la forma dibujada y el registro de origen.

Si están bien ejecutados, pueden ser muy efectivos y novedosos. En la figura 30 podéis ver una figura con un ejemplo aplicado a la población en Europa, donde el tamaño de los países es proporcional a su población.

Figura 30. Cartograma representando volumen de población en Europa



Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Cartograma.

Notad, por ejemplo, el tamaño del Reino Unido, muy poblado, frente al muy reducido de los países escandinavos. De forma particular, la figura presentada muestra otra variable, como es la densidad de población, mediante la superposición al cartograma de una representación de coropletas.

Elementos complementarios del mapa

Si el usuario final del mapa es el propio creador, le bastará seguramente con utilizar las herramientas proporcionadas por el software SIG. Si, por el contrario, el usuario final es externo, y recibirá el mapa por otros medios (impreso, dentro de una aplicación web…), probablemente el esfuerzo cartográfico habrá de ser mayor.

Para lograr un buen mapa, se deben considerar varios elementos complementarios:

- Una correcta elección de escala, proyección y procesos de generalización de entidades.

- Un buen etiquetado de elementos (color, distribución espacial, tipo de fuente…).

- Rejillas con coordenadas, si fuera preciso.

- Una leyenda de fácil interpretación.

- Un título principal.
- Textos complementarios (fuentes, fecha, responsable...).
- Y en general los aspectos ligados al diseño gráfico, para lo cual es frecuente trabajar ya con herramientas externas al SIG.

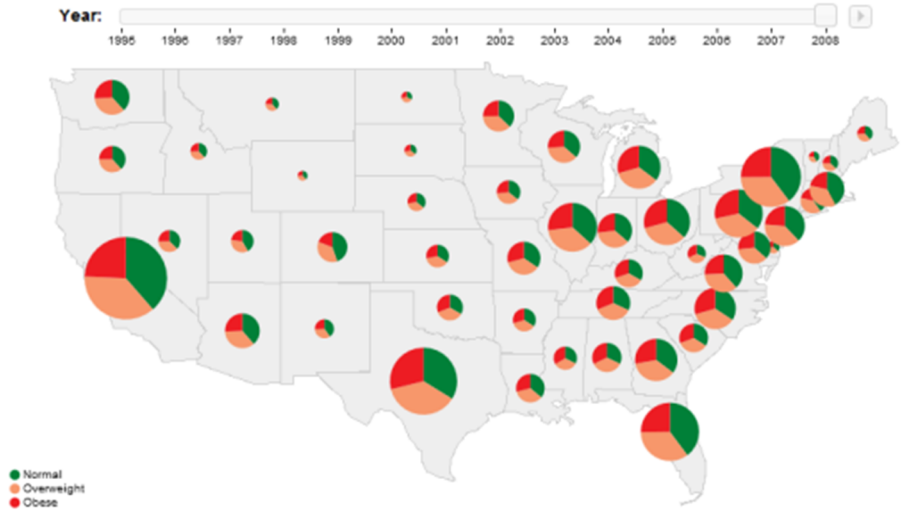
3.3.3. Otras formas de presentación de datos

La información gestionada por un SIG puede presentarse ante el usuario de otras formas, distintas y/o complementarias a los mapas que se han presentado en apartados previos.

Tablas y gráficos

Una forma muy habitual de representar la información son las **tablas**. Con la componente temática de los datos, por ejemplo, se podría presentar una tabla con las regiones de un país, con los correspondientes valores de los campos población y PIB per cápita. En estas tablas, se puede mostrar información básica de los datos geográficos o ciertos **valores estadísticos** (es habitual que existan funciones básicas al respecto en los paquetes de software SIG).

Figura 31. Mapa con gráficos de sectores



Fuente: Anita Graser.

De forma frecuente, se presentan también **gráficos** elaborados con los datos del SIG (lineales, de barras, histogramas...), bien junto al mapa o incluso sobre él. En la figura 31, se muestra la distribución de la población de Estados Unidos según su peso, usando **diagramas de sectores o *pie charts*** (verde peso normal, naranja sobrepeso y rojo obesidad).

En todo caso, las capacidades de los SIG para el ámbito de los gráficos y las estadísticas son reducidas, por lo que frecuentemente se realiza una exportación a un fichero como .CSV, para su posterior preparación con otras herramientas.

Mapas en 3D

Los mapas tradicionales muestran, sobre el plano 2D, los datos geográficos de interés (usando coordenadas X, Y). No obstante, muchos datos pueden representarse en 3D para su mejor comprensión (con coordenadas X, Y, Z, siendo Z la variable temática de interés).

Un caso particularmente útil es la representación del terreno mediante **mapas tridimensionales**, que ayudan a entender la disposición de la altitud de un MDE. El ángulo de visión, la exageración de la dimensión Z o el uso de capas complementarias dispuestas encima (por ejemplo, foto satélite de la zona) contribuyen a una visualización más rica, tal y como se muestra en la figura 32, en la que se observa un terreno montañoso y un cauce fluvial, junto a lo que parecen zonas pobladas (en color más rosado).

Modelo digital de elevaciones (MDE)

Un MDE es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Lectura complementaria

A. M. Felicisimo (1994). "El modelo digital de elevaciones".

Figura 32. Vista 3D de un MDE, con imagen de satélite Landsat

Fuente: GRASS GIS.

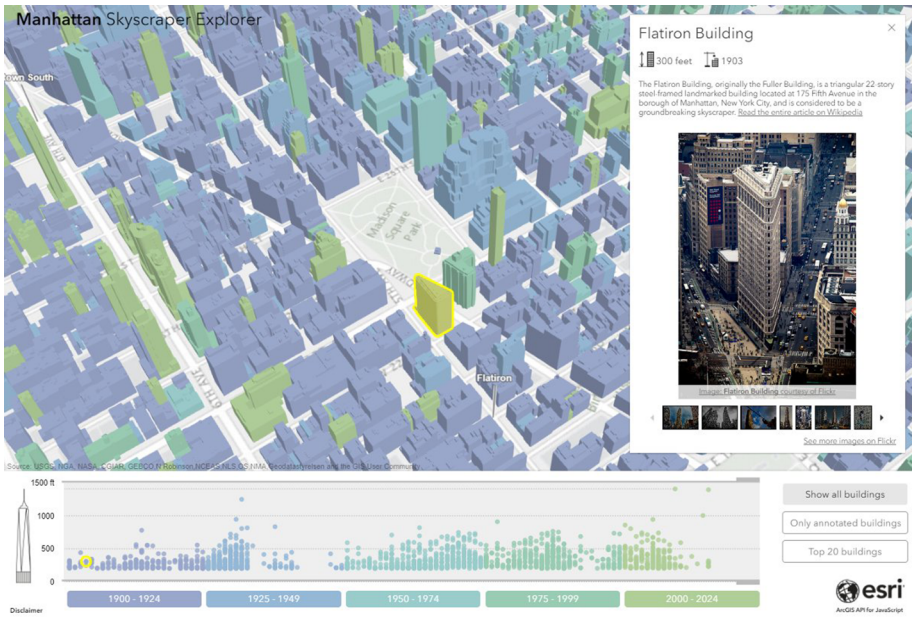
La visualización tridimensional no está restringida a información bajo modelos *raster*. Es frecuente encontrar visualizaciones de capas vectoriales, como la de la figura 33, en la que los polígonos de los edificios se extruyen y se ofrece una vista isométrica.

Vista isométrica

Una vista isométrica es un método gráfico de representación en el que se visualiza un objeto 3D sobre 2D, usando tres ejes ortogonales.

La extrusión de polígonos consiste, por su parte, en usar la forma en superficie y expandirla en vertical, para generar un efecto de volumen 3D.

Figura 33. Vista isométrica de edificios



Fuente: ESRI / ArcGIS API for JavaScript.

Por otro lado, en los últimos años se ha extendido el uso de **globos digitales** para visualizar información geográfica, que reducen los inconvenientes de usar una determinada proyección cartográfica. Siguiendo al pionero **Google Earth**, se han desarrollado otros visores de globo, como **Cesium** o **NASA World Wind**.

Visualizaciones interactivas

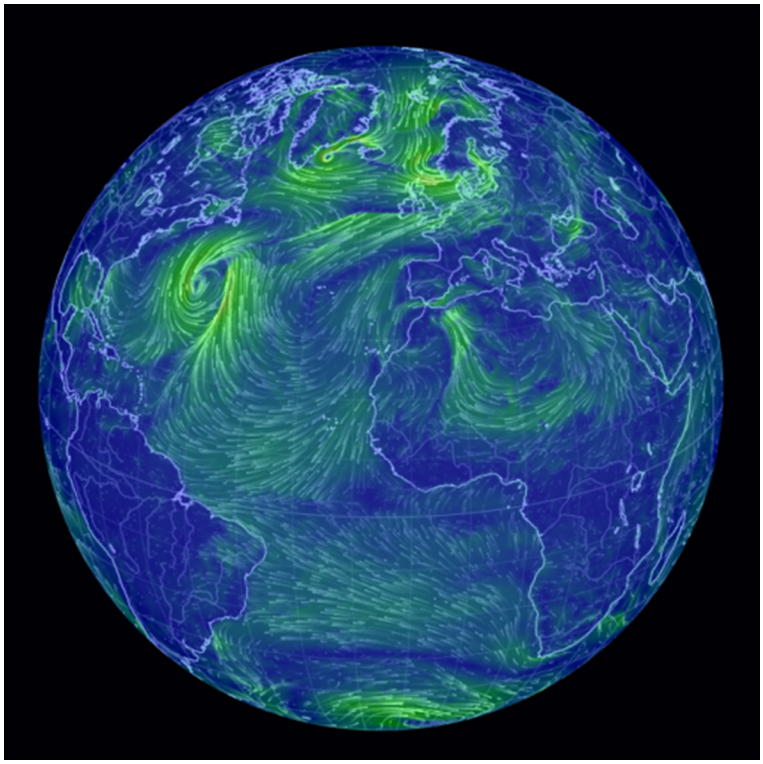
Un mapa estático puede ser sin duda muy valioso y eficiente para trasladar una información en clave espacial. Pero en otras ocasiones una visualización geográfica interactiva, en la que el usuario participa de forma activa, es una mejor herramienta de exploración.

Bien se muestren en escritorio o sean visualizaciones interactivas publicadas en Internet (en cuyo caso lo habitual es que estén desarrolladas con JavaScript), suelen permitirse interacciones mediante teclado (para zoom, rotación, cambio de ángulo…) y especialmente acciones con ratón, como el clic sobre la propia información temática representada y controles auxiliares.

Un aspecto para el que las visualizaciones son especialmente útiles es la representación de procesos con una componente temporal, como trayectorias de vehículos, fenómenos con desplazamiento de fluidos, como un proceso de inundación o una erupción, etc. Mediante una reproducción automática, a modo de vídeo con información geográfica, o presentando controles para avanzar, retroceder o ir a un instante temporal, las animaciones en estas vi-

sualizaciones permiten aprehender de forma muy intuitiva los cambios espaciales en el tiempo. En la figura 34, a continuación, se muestra un ejemplo de estas visualizaciones.

Figura 34. Earth, una visualización geográfica interactiva y dinámica



Fuente: Cameron Beccario, Proyecto Earth.

Earth presenta un globo interactivo y sobre él la predicción de variables meteoceánicas generadas por centros de investigación como la NOAA (temperatura, velocidad del viento, corrientes oceánicas...).

3.4. Análisis *raster*

Las capas *raster* son matrices de datos georreferenciadas. Son ideales para aplicar en ellas procesos de cálculo. Una de las fortalezas principales del modelo *raster* es precisamente la capacidad que otorga para crear nueva información a partir de la combinación de capas existentes, en un proceso denominado modelización cartográfica o **álgebra de mapas**. Por ejemplo, conociendo la temperatura media, la acidez del suelo, el nivel de humedad y el grado de la pendiente, podría derivarse una nueva capa *raster* que señale las zonas idóneas para una determinada especie vegetal.

En los cálculos se puede operar con valores en una sola celda (**operaciones locales**), en celdas próximas (**operaciones de vecindad**, sea **inmediata** o **extendida**) o con valores de agrupaciones de celdas (**operaciones zonales**).

A continuación, se recogen las principales operaciones de análisis, de acuerdo a esta tipología.

3.4.1. Operaciones locales

En las operaciones locales se usa solamente el valor del píxel y a éste se le aplican operaciones matemáticas, frecuentemente con operadores aritméticos (sumar, restar, multiplicar, logaritmo…) y operadores lógicos (igual, menor que, mayor que…) junto a expresiones combinadas con Y (AND) y O (OR).

En una operación local se puede usar una sola capa (**reclasificación**) o simultáneamente varias capas, tomando el valor del píxel en cada una de ellas (**superposición de mapas**).

Reclasificación

En el siguiente ejemplo se muestra una reclasificación, usando un *raster* simplificado de 3 x 3 celdas. En este caso, se trata de una conversión entre grados Celsius (a) y Kelvin (b), mediante la aplicación de una operación aritmética a la capa (se suma a cada píxel +273.15).

a) ºC:

15	17	18
20	19	23
21	23	25

b) K:

288,15	290,15	291,15
293,15	292,15	296,15
294,15	296,15	298,15

La reclasificación aplica en casos como los siguientes:

- En una capa se quieren cambiar las unidades de medida. Por ejemplo, se quiere pasar la altitud de centímetros a metros, y para ello se divide el valor de altitud de cada píxel por 100.

- Una capa con valores continuos se quiere dividir en intervalos más amplios. Por ejemplo, la temperatura en cada píxel, se redondea a múltiplos de 5º.

- Una capa cualitativa con 20 tipos de usos del suelo se quiere simplificar a 3 categorías más amplias: suelo urbano, infraestructuras de transporte y suelo rural (en la categoría "rural" se incluirían, por ejemplo, todos los píxeles con valor bosque, marisma, tierra de cultivo, pastizal, etc.).

- Una capa con valores de pendientes se quiere transformar a sólo 2 valores: hay una pendiente inferior al 5% → valor 1; o no la hay (pendiente > = 5%) → valor 0. Cuando se produce este tipo de reclasificación, hablamos de un **mapa binario**.

Superposición de mapas

En el siguiente ejemplo se muestra cómo combinar dos *raster* mediante superposición de mapas. El objetivo es buscar emplazamientos donde se cumplan dos criterios simultáneos: pendiente <5% y suelos calizos.

Álgebra de Boole

El álgebra de Boole o booleana rige las operaciones lógicas que se desarrollan con los mapas binarios.

En este sistema, las variables sólo pueden tomar dos valores discretos: verdadero y falso, que pueden denotarse también como 1 y 0, respectivamente.

a) Capas de entrada:

Pendiente < 5%			Suelo calizo		
1	0	1	0	1	0
0	0	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1

b) Zonas con ambos criterios:

0	0	0
0	0	1
0	1	1

La superposición de mapas se puede usar para situaciones como:

- Combinar capas lógicamente, cada una con un criterio que se quiere satisfacer simultáneamente en el territorio. Para ello, se han de reclasificar las capas en mapas binarios y luego se aplica sobre ellas un Y lógico.

- Calcular un valor aritmético considerando varias capas. Por ejemplo, el valor máximo de precipitación por píxel, a partir de una serie de capas *raster*, con valores calculados para cada hora.

3.4.2. Operaciones de vecindad inmediata

En las operaciones de vecindad inmediata, para calcular el valor de un píxel en la nueva capa, se tienen en consideración los valores de las celdas inmediatamente contiguas. Esto es, habitualmente, el conjunto de 8 celdas alrededor de cada píxel central, y para ello se toma como **entorno de trabajo o ventana** un cuadrado de 3 x 3 píxeles.

Filtrado: suavizado y realce

El proceso de filtrado consiste en el cambio de valor de cada píxel, mediante la aplicación de una determinada expresión matemática al conjunto de píxeles de su ventana.

Si se desean eliminar variaciones locales en una capa y señalar tendencias generales, puede aplicarse un **proceso de suavizado**. En este caso, la clave es utilizar pesos similares para todos los píxeles vecinos. Por ejemplo, en la siguiente tabla se muestra un filtro con pesos idénticos para todos los píxeles, lo que refleja la media aritmética, una de las formas más usadas de suavizado.

Ejemplo de filtro de suavizado		
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

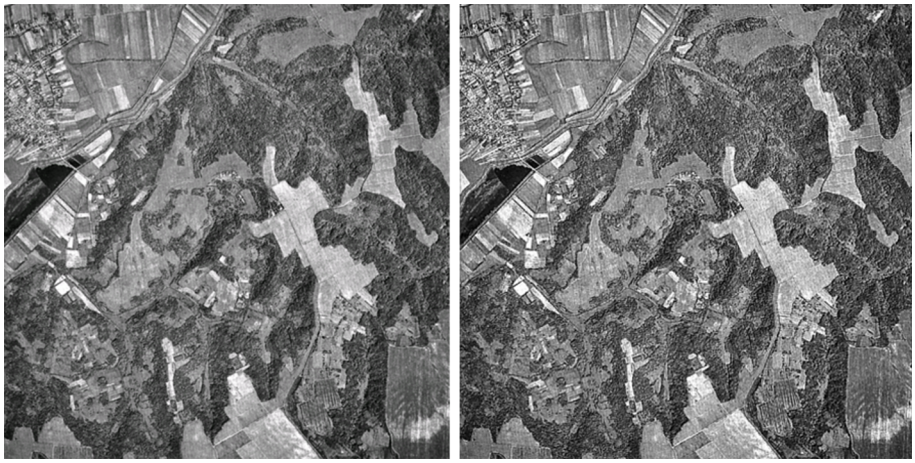
Dado que el filtro de la media puede ser demasiado intenso, es habitual subir de peso al píxel de interés (el central, ponderado por ejemplo con 6/9) y reducirlo de forma oportuna a sus vecinos. Un filtro de suavizado como éste puede ser útil, por ejemplo, para atenuar valores de altitud dispares dentro de un

MDE generado con pocos datos. Por contra, para lograr un realce, tal y como muestra la figura 35 (original A, filtrada B), hay que usar pesos negativos en los píxeles vecinos.

Ejemplo de filtro de realce		
-0,1	-0,1	-0,1
-0,1	1,8	-0,1
-0,1	-0,1	-0,1

Figura 35. Filtro de realce aplicado sobre una imagen

A B



Fuente: Olaya (2014).

Pendientes, orientaciones y cuencas de drenaje

Cuando el *raster* es un modelo digital de elevaciones (MDE), con la altitud del terreno, pueden aplicarse operaciones de vecindad y derivar capas muy útiles, gracias a las diferencias relativas de altitud y a la aplicación de una serie de cálculos. Estos cálculos se basan en ir tomando sucesivamente, para cada píxel, los valores contiguos, en tandas de 3 x 3 celdas (es lo que se denomina **ventana de cálculo móvil**).

Tomando como base el MDE, se puede derivar la **pendiente** de una nueva capa mediante cálculos de distancia y altitud. Y a partir de ésta, determinar la **orientación** en grados respecto al norte. La orientación suele reclasificarse después para agruparse en categorías mayores (por ejemplo, N, S, E, O).

Otras dos aplicaciones de la pendiente muy útiles son:

a) Cálculo de cuencas de drenaje. Conocidas las pendientes, se puede caracterizar hacia qué dirección fluye el agua desde cada píxel y luego agregar los resultados formando cuencas.

b) Sombreado del relieve. Usando un foco de luz teórico y calculando las sombras proyectadas hacia cada píxel, se puede dar una sensación realista de relieve.

Para todas estas explotaciones, los SIG suelen poseer funciones integradas, que toman el MDE como *input* principal.

3.4.3. Operaciones de vecindad extendida

Se trata de un grupo de operaciones en las que se consideran otras celdas, al margen de que sean o no contiguas.

Cálculos basados en distancias

Se puede operar con las distancias entre píxeles para realizar análisis de proximidad, por ejemplo, si se quiere modelizar la distancia a una industria para luego valorar el impacto sonoro en su entorno. La siguiente tabla refleja las distancias, en línea recta, a la celda superior izquierda, donde se encontraría la industria, asumiendo un píxel de 20 x 20 metros.

***Raster* de distancias**		
0	20	40
20	28,3	44,7
40	44,7	56,6

Si se determina que el impacto sonoro alcanza los 40 metros, entonces es factible realizar un análisis de proximidad sobre el *raster* de distancias (*buffer*) y así saber las zonas afectadas (valor 1).

***Raster* con celdas a distancia <= 40 metros**		
1	1	1
1	1	0
1	0	0

Superficies de fricción

La distancia es un indicador de coste de desplazamiento, pero no el único. Otros costes pueden ser más interesantes para un problema espacial, por ejemplo, el tiempo invertido en el desplazamiento o la cantidad de gasolina consumida.

El análisis de las superficies de fricción permite, mediante la cuantificación previa y la asignación de un **valor de fricción** (tiempo, coste económico…) a cada celda, calcular el coste de desplazamientos en el terreno.

Otra aplicación directa es el **análisis de caminos mínimos** entre celdas. Un caso práctico puede ser, por ejemplo, la búsqueda de la mejor ruta de evacuación de personas hacia un refugio en un área bajo riesgo de incendio, o el mejor trazado para una carretera en una zona de montaña.

3.4.4. Operaciones zonales

En las operaciones zonales se agrupan las celdas por su valor, que indica pertenencia a una clase, sean sus celdas contiguas o no. Como resultado, se generan zonas o grupos de píxeles, con un identificador común. Por ejemplo, si se toma un MDE y se reclasifica en tres categorías: 0-200, 200-600 y más de 600 metros, podríamos analizar luego la relevancia de esos tipos de terrenos bajos, medios y montañosos en una región.

Las zonas obtenidas pueden medirse, explotarse con estadísticos o incluso vincular información relacionada a ellas. Un ejemplo sería obtener, a partir de un mapa de usos del suelo, cuál es el tamaño en hectáreas para cada grupo (por ejemplo, bosques caducifolios, infraestructuras, láminas de agua, etc.).

3.5. Análisis vectorial

Sobre las capas vectoriales pueden desarrollarse una variedad amplia de operaciones de análisis. Es frecuente, por ejemplo, aplicar un análisis estadístico de su componente temática (medidas de tendencia central, variabilidad, regresión, etc.). Sin embargo, en este apartado nos centraremos en el análisis que involucra la componente espacial, y mostraremos sólo los más característicos.

3.5.1. Distancias, mediciones y análisis de proximidad

Comenzaremos el análisis vectorial con las funciones de distancia y medición para, a continuación, estudiar qué es el análisis de proximidad.

Distancias y mediciones

En un espacio continuo como el vectorial, la distancia refleja mediante una función matemática la separación entre dos puntos, tomando en consideración las coordenadas de cada uno de ellos. El resultado se ofrece habitualmente en las mismas unidades de entrada y, de forma generalizada, se utiliza la distancia euclidiana.

Distancia euclidiana

La distancia euclidiana, la más extendida, se calcula a partir del teorema de Pitágoras.

Dados dos puntos en un espacio 2D, llamados P1 y P2, con coordenadas (x1,y1) y (x2,y2), la distancia entre ellos equivale a la raíz cuadrada de la suma al cuadrado de sus diferencias en x y en y. Esto es:

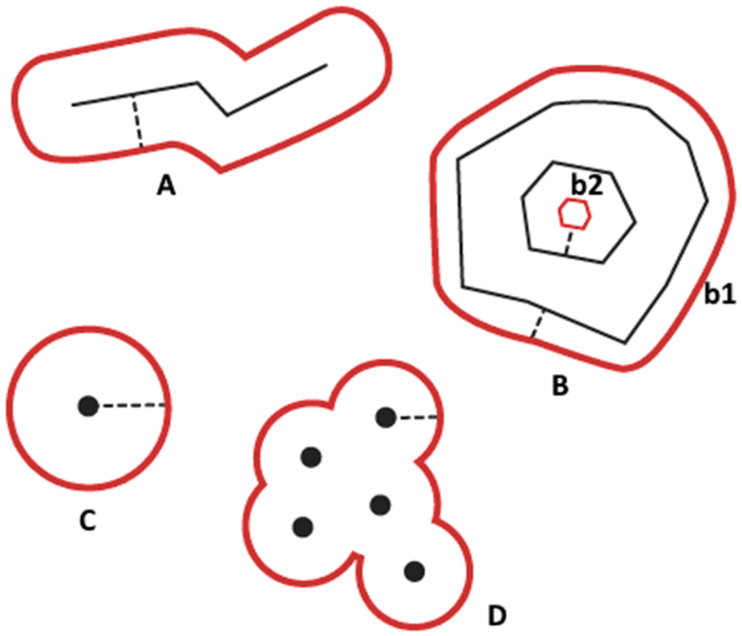
Distancia = Raíz cuadrada de (x2 – x1)^2 + (y2 – y1)^2.

Además de la medición de las distancias, están las operaciones de **medición de magnitudes** de las geometrías de la capa: longitud de una línea, perímetro y área de un polígono. En los SIG existen habitualmente controles para medir de forma interactiva mediante dibujado en pantalla, pero también funciones que, aplicadas a los registros, computan estas magnitudes y generalmente las agregan como nuevos campos a las filas.

Análisis de proximidad o *buffer*

También apoyada en la medición de distancias, el **área de proximidad o *buffer*** es una de las operaciones más características de los SIG. Consiste en el dibujado de un polígono alrededor de un objeto geográfico, delimitando el área que queda a menos de una determinada distancia en línea recta. Un ejemplo de su utilidad sería delimitar el terreno a menos de 500 metros a cada lado de una nueva carretera proyectada, con el fin de establecer el área a expropiar.

Figura 36. *Buffer* sobre distintos tipos geométricos



Fuente: Traducido de ESRI.

Tal y como se muestra en la figura 36, el *buffer* se puede aplicar sobre puntos (C), líneas (A) y polígonos (B) y, cuando solapan áreas de influencia de varios registros, pueden fusionarse (D). El *buffer* en polígonos puede ser **exterior** (el caso más común, b1) o **interior** (caso b2).

Es muy habitual combinar el *buffer* con otras operaciones analíticas o de consulta: por ejemplo, continuando con el ejemplo de la carretera previa, se podría completar el análisis consultando cuáles son las parcelas afectadas por el área a expropiar y luego seleccionando la información de sus propietarios.

Polígonos de Thiessen

Otra explotación sobre las distancias son los **polígonos de Thiessen**: un reparto del territorio generando polígonos a partir de una capa de puntos, para delimitar zonas según la proximidad a dichos puntos.

Un posible caso de uso puede ser la determinación de regiones pluviométricas en una región, a partir de una capa con estaciones meteorológicas.

3.5.2. Superposición

En las operaciones de superposición entran en juego al menos dos capas y se genera una tercera como resultado fruto de operaciones geométricas. Este tipo de análisis tiene objetivos similares al álgebra de mapas en ***raster***, pero computacionalmente es más complejo que la multiplicación de matrices. Según los tipos de geometría involucrados (punto / línea / polígono), pueden aplicarse distintos análisis, tal y como se observa en la figura 37.

Ved también

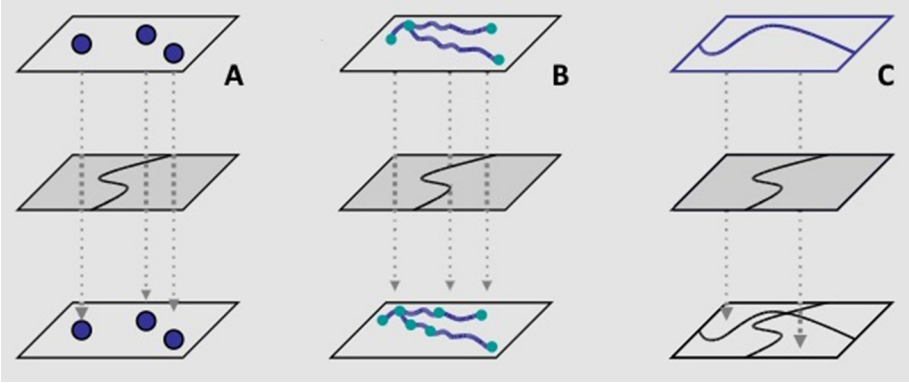
El álgebra de mapas *raster* se trata en el apartado 3.4, "Análisis *raster*", de este módulo didáctico.

a) Punto en polígono: es útil para determinar la pertenencia de un punto a un polígono de interés, mediante una relación topológica de inclusión. Esto permite extraer luego información temática ligada al polígono, la cual se transfiere a la nueva capa de puntos resultante. Por ejemplo, una capa de puntos con escuelas se cruza con una capa de distritos, para determinar su adscripción a éstos.

b) Línea en polígono: asigna a cada línea que cruza un polígono la información temática asociada al polígono. Geométricamente, las líneas se parten si atraviesan varios polígonos, por lo que se generarán nuevos registros y cada fragmento de línea tendrá la información correspondiente al polígono que cruza. Un ejemplo podría ser el cruce de una capa lineal de ríos con una capa poligonal de espacios naturales protegidos, con el fin de saber a qué figura legislativa está sujeto cada tramo.

c) Polígono en polígono: cada polígono en la primera capa se fragmenta con los polígonos de la segunda capa mediante los contornos de éstos (**intersección**). Como resultado, hay una multiplicación del número de registros poligonales en la capa resultante, y contienen atributos derivados de ambas capas. Un ejemplo podría ser el análisis de una capa de litología y otra de formaciones vegetales, para estudiar la relación entre el tipo de suelo y la vegetación.

Figura 37. Análisis de punto, línea y polígono en polígono



Fuente: Adaptado de Arcgis Training; https://www.slideshare.net/yashasweesharma/arcgis-training-day1.

Otras operaciones entre dos capas de polígonos, A y B, surgen al aplicar otros criterios booleanos para determinar qué elementos del solapamiento mantener:

- **Recorte**: en el resultado aparece la zona de A donde haya solapado B. Esto puede ser útil, por ejemplo, para extraer información temática de varias capas de interés (A) y restringirlas espacialmente a un municipio concreto (capa B).

- **Unión**: se mantienen A y también las formas de B en su totalidad.

- **Diferencia**: el opuesto a intersección.

Ved también

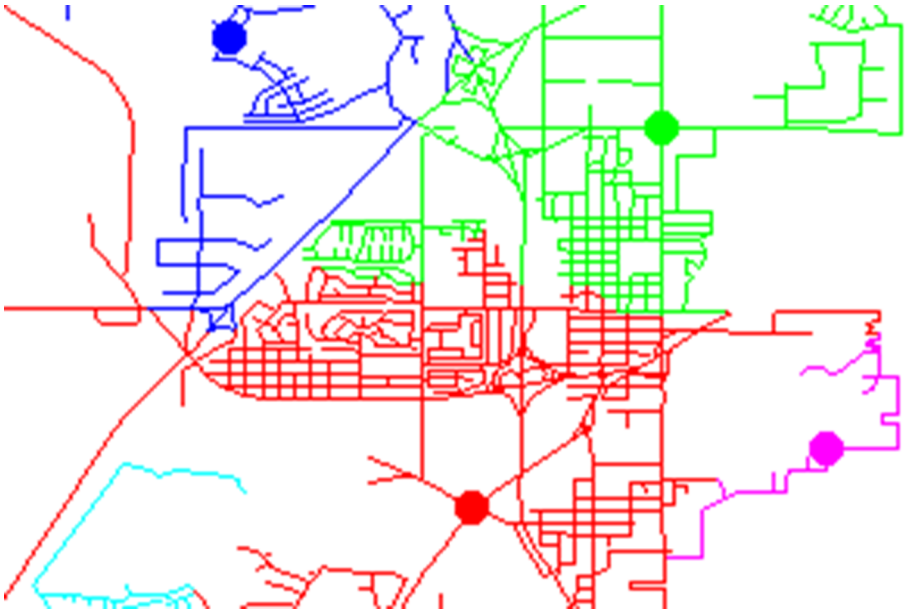
En el apartado 3.2.3.1, "Consultas a bases de datos", se presenta una tabla con las funciones espaciales de intersección, unión y diferencia, incluyendo diagramas de ejemplo.

3.5.3. Análisis de redes

El modelo vectorial es ideal para recoger estructuras de arcos y nodos y aplicar modelos del análisis de redes. Sean redes de origen natural (por ejemplo, fluviales) o construidas (redes de agua potable, alcantarillado, eléctricas...), las redes son un objeto geográfico de primer orden y muy comunes en la aplicación de los SIG.

Las dos principales explotaciones del análisis de redes son el cálculo de **caminos mínimos** y el **establecimiento de áreas de influencia**. Por ejemplo, un SIG puede guiar el desplazamiento por carretera entre dos puntos de la red (*routing*), usando como criterio la distancia o determinados pesos de los arcos (por ejemplo, la velocidad permitida en cada tramo).

Figura 38. Aplicación de análisis de redes a áreas de influencia comerciales



Fuente: http://www.microimages.com/.

Del mismo modo, tal y como muestra la figura 38, es habitual usar SIG en el ámbito del **geomarketing**, para estudiar el área de servicio de establecimientos como centros comerciales.

3.5.4. Otros análisis

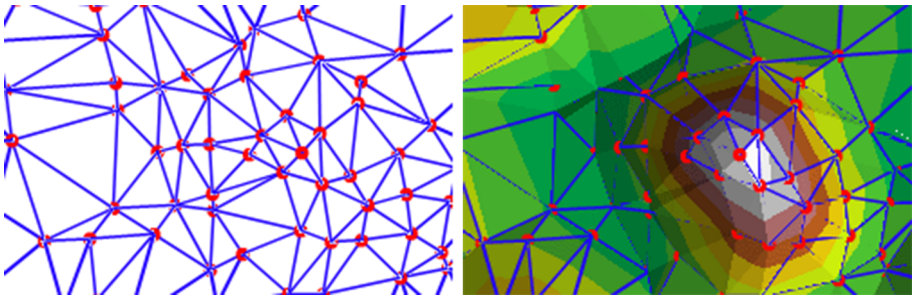
Existen muchos análisis sobre capas vectoriales:

a) Agregación o disolución. Consiste en la unión de objetos geográficos de una misma capa, con un criterio basado en atributos temáticos, sean polígonos contiguos o no. Por ejemplo, se puede disolver una capa de municipios relacionados para formar una capa de comarcas, agregando durante el proceso no solo su geometría, sino también otros campos como por ejemplo la población de cada uno.

b) Envolvente convexa (*convex hull*). Se trata de producir una capa con un polígono que recoja dentro todos los registros de la capa origen, tratando de tener la menor área posible.

c) Operaciones con TIN: sobre un modelo de triángulos, se pueden calcular de forma eficiente pendientes y cuencas de drenaje, al igual que con modelos *raster* de elevaciones. Un TIN (*triangulated irregular network*) es, como se aprecia en la figura 39, una representación de la superficie que utiliza una malla de triángulos irregulares, derivados de un proceso previo de triangulación.

Figura 39. Modelo TIN para representar el relieve



Fuente: adaptado de ESRI; http://desktop.arcgis.com.

4. Los SIG en la sociedad actual

En esta parte de este módulo entraremos en la vertiente social de los SIG. Después de haber estudiado qué son los SIG (primera parte del módulo), y de haber entrado en detalle en cómo son los datos geográficos y las funciones de un SIG (segunda y tercera parte del módulo, respectivamente), ahora toca estudiar la vertiente social de los SIG en la sociedad actual. ¿Quién utiliza los SIG? ¿Por qué y para qué se utilizan los SIG? ¿Qué repercusión tienen en la sociedad actual? ¿Qué tendencias presenta el futuro de los SIG?

Los sistemas de información geográfica son una herramienta habitual de nuestro mundo. Su eficacia se demuestra en numerosas aplicaciones de gestión de recursos, análisis de alternativas, herramienta de soporte en la toma de decisiones y en planes de actuación frente a diversidad de situaciones. A este respecto, ya comentamos unos ejemplos de aplicaciones SIG donde pudimos observar sus funciones.

Empezaremos con el subapartado 4.1, donde se estudiará detalladamente la utilización de los SIG y se ampliarán los ejemplos de aplicaciones SIG en las administraciones públicas –en el tema de catastro y planificación–, en organizaciones no gubernamentales (ONG), en empresas de servicios públicos (ESP), transporte, medio ambiente y agricultura. Mostraremos ejemplos de aplicaciones donde se capturan datos con terminales móviles, así como la relación de los SIG con temas tan actuales como el *big data* y los vehículos no tripulados. Hablaremos también de las aplicaciones que explotan datos de nuevos sensores y de las que usan datos para navegar por espacios *indoor*.

Ved también

Repasad el subapartado "Ejemplos prácticos de aplicaciones SIG", del apartado 1 de este módulo.

Para finalizar, explicaremos en el subapartado 4.2 cómo trabajamos en SIG a través de la propuesta de una metodología de desarrollo.

4.1. Para qué utilizamos un SIG

Cada vez más individuos y organizaciones de todo tipo utilizan los SIG para dar respuesta a la pregunta fundamental que ya apuntábamos al empezar este módulo: **¿dónde?**

> "La importancia de saber dónde está ocurriendo algo. Conocer dónde está sucediendo alguna cosa es de vital importancia si queremos ir allí o enviar a alguien; o si queremos encontrar alguna otra información acerca del mismo sitio; o simplemente, por ejemplo, si queremos informar a la gente que vive alrededor."

Ved también

Repasad el subapartado "La información geográfica", del apartado 1 de este módulo.

En este sentido, los SIG no son sólo herramientas dentro de este contexto de gran importancia de la información geográfica, sino en gran medida responsables de que esta situación sea tal, pues su contribución dentro del panorama relativo a la geografía ha sido vital para impulsar ésta y hacerla llegar hasta su lugar actual.

En una sociedad donde la **información** y la **tecnología** son dos de los pilares fundamentales, los SIG son, sin lugar a dudas, la tecnología estandarte para el manejo de información geográfica, y los elementos básicos que canalizan la gestión de todo aquello que, de un modo u otro, presente una componente geográfica susceptible de ser aprovechada (Olaya, 2014).

Esta importancia del "dónde" es debida al gran crecimiento y evolución paralela de estas nuevas tecnologías, las cuales cada vez tienen una presencia más significativa en nuestras vidas cotidianas. Así, por ejemplo, tenemos una gran disponibilidad de SIG a través de Internet, igual que amplias redes de conexión locales que permiten el acceso rápido a la información. A lo que podemos añadir la utilización de SIG móviles en dispositivos portátiles.

La geografía ha pasado de ser un ámbito particular con cierta relación con otros campos a ser un elemento fundamental incorporado a la mayoría de las disciplinas, lo que se traduce directamente en un aumento de **uso del SIG como herramienta integradora** de información geográfica.

Otro punto que también ha influido en la utilización del SIG es la disminución en el precio del hardware y el software debido al crecimiento rápido de la demanda. En este caso también cabe destacar el gran desarrollo de los llamados "software libre" (*open source*), los cuales, entre otras características, no tienen coste de licencia.

También debemos señalar otros puntos no menos importantes por los cuales el SIG está experimentando este crecimiento:

- Conciencia creciente de por qué los procesos de toma de decisiones tienen una dimensión espacial.

- Mejora de la facilidad de interacción del usuario mediante la utilización de entornos de trabajo estandarizados.

- Mejora de las tecnologías de soporte de las aplicaciones, específicamente en términos de visualización, gestión y análisis de datos y de las relaciones con otros software.

- Proliferación de los datos digitales referenciados geográficamente. Por ejemplo, aquellos generados mediante tecnologías de sistemas de posicionamiento global (GPS).

- Experiencia acumulada de aplicaciones en cada campo de trabajo.

Pero ¿por qué enfrascarse en la implementación de un SIG? A continuación, se exploran algunas de las aplicaciones más importantes.

4.1.1. Aplicaciones de los SIG

A continuación, presentamos ejemplos de aplicaciones SIG actuales en diferentes ámbitos, como en las administraciones públicas, catastro y planificación, organizaciones no gubernamentales, empresas de servicios públicos (ESP), transporte, medio ambiente, agricultura, captura de datos con terminales móviles, vehículos no tripulados, *big data* y navegación *indoor*.

1) Administraciones públicas

Las administraciones centrales o locales hacen uso intensivo de los SIG. Más del 70% de las tareas en la administración están geográficamente referenciadas. Actualmente, existen muchas aplicaciones que pueden ayudar en las diferentes tareas de gestión y decisiones políticas, por ejemplo, asesorías de impuestos, demarcaciones, seguros de viviendas, soluciones catastrales, aplicaciones legislativas, seguridad pública, desarrollo sostenible, planeamiento urbano, planificación de transportes, inventariado de recursos, gestión del territorio, desarrollo económico, elecciones, y distribución de servicios sanitarios, etc.

Ejemplo: la Unidad Municipal de Análisis Territorial (UMAT) del ayuntamiento de Gerona

El Ayuntamiento de Gerona creó en 1995 la Unidad Municipal de Análisis Territorial (UMAT), que se encarga de la gestión de toda la información territorial del municipio desde tres ámbitos diferentes:

1) Servicio Municipal de Cartografía. Control y gestión de los temas relacionados con la geodesia, el servidor de cartografía y la información de base como son los mapas topográficos, las ortoimágenes y los modelos 3D.

2) Gestión del Sistema de Información Territorial. Control de la referencia territorial, las áreas municipales y la cartografía administrativa.

3) Análisis Territorial. Control del estudio y análisis de los datos resultantes del sistema de información territorial, como pueden ser estudios de población y vivienda.

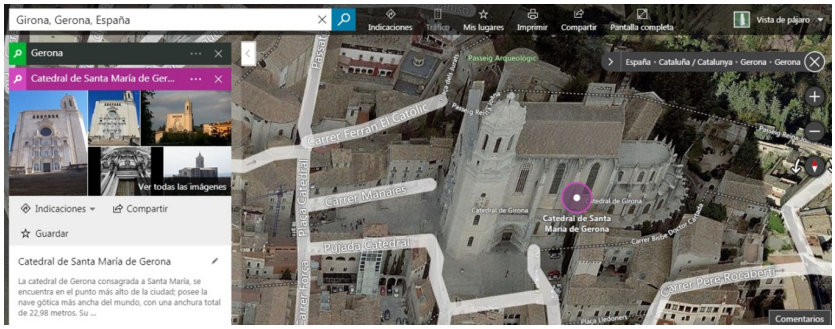
La UMAT ofrece esta información geográfica en línea tal y como podemos observar en la figura 40, o también se puede descargar en los diversos formatos que ofrece este mismo portal web. A través de la UMAT, el Ayuntamiento de Gerona proporciona una solución integradora de la gestión municipal con referencia al territorio basada en tecnología SIG.

Figura 40. Servicio Municipal de Cartografía del Ayuntamiento de Gerona

Fuente: Ayuntamiento de Gerona.

Entre otros servicios, el portal permite el acceso a un visor donde se combinan las fotografías aéreas verticales, oblicuas y a pie de calle junto con otras capas de cartografía temática consultables. Podéis ver un ejemplo en la figura 41:

Figura 41. Imagen aérea oblicua de la ciudad de Gerona



Fuente: https://es.goolzoom.com/?
&lat=41.982024&lng=2.823327&zoom=18&type=3&marker=41.981796,2.823700&om=1&fc=&ma=.

2) Catastro y planificación

En el catastro la parcela de territorio es la unidad básica para el acceso, el control y las decisiones en el terreno. La información actualizada y fiable del terreno es necesaria para diferentes usos como planificación del territorio, desarrollo y el mantenimiento de infraestructuras, protección ambiental y gestión de recursos, servicios de emergencia o programas de asistencia social, entre otros.

Los objetivos de mantener la información catastral y territorial son:

- La descripción legal de la propiedad en sistemas referenciados, para evitar problemas de límites ambiguos o superpuestos.

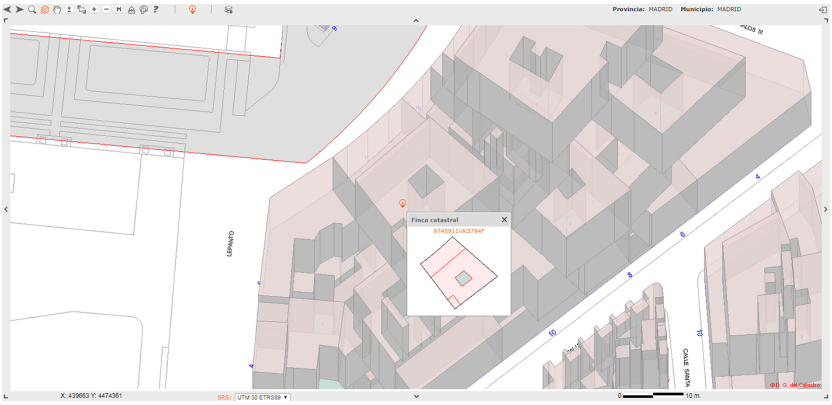
- La descripción de relaciones espacio-territoriales complejas como, por ejemplo, la evolución de una parcela privada en el desarrollo conjunto de la ciudad.

- El acceso al público de la información.

Ejemplo: Oficina Virtual del Catastro

La Oficina Virtual del Catastro ofrece atención al usuario que necesita obtener o consultar información catastral a través de Internet. En este caso, la figura 42 muestra una parte de la Plaza Oriente de Madrid.

Figura 42. Consulta en la web de la Oficina Virtual del Catastro. Visualización de algunas de las parcelas de la Plaza Oriente en Madrid



Fuente: https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?del=28&mun=900&refcat=9745911VK3794F0001DR&final=#.

3) Organizaciones no gubernamentales

La utilización de los SIG por parte de las ONG ha dejado de ser minoritaria. Los SIG pueden ayudar a llevar a cabo las actividades de estas organizaciones, en lo referente a la planificación, la gestión y la evaluación de los proyectos que desarrollan.

Ejemplo: Humanitarian Openstreetmap Team (HOT)

Disponer de mapas gratuitos y actualizados es crucial para la ayuda humanitaria en casos de desastres naturales o conflictos políticos. Por ello, el equipo de Humanitarian Openstreetmap Team (HOT) se encarga de coordinar la ayuda de voluntarios de todo el mundo que, en momentos cruciales, digitalizan a través de su plataforma web datos de aquellas zonas en las que se necesita cartografía con urgencia. En la figura 43 podéis ver el proyecto correspondiente a la ayuda para erradicar la malaria identificando los focos de la enfermedad para establecer sistemas de prevención y seguimiento.

Figura 43. Plataforma gestionada por HOT para la campaña de erradicación de la malaria

Fuente: https://www.hotosm.org/projects/malaria_elimination_campaign.

Ejemplo: Missing Maps – Poner a las personas más vulnerables de la Tierra en el mapa

Cada año, los desastres naturales matan a cerca de 100.000 personas y afectan o desplazan 200 millones de personas en el mundo. Muchos de los lugares donde ocurren esos desastres son totalmente inexistentes en los mapas actuales. Eso conlleva que los primeros auxilios carezcan de la información necesaria para poder tomar las decisiones correctas sobre el terreno. Missing Maps es un proyecto abierto, colaborativo, en el que se puede participar cartografiando zonas donde las organizaciones humanitarias tratan de responder a las necesidades de las poblaciones afectadas. Está fundado por Médicos Sin Fronteras (MSF) en colaboración con HOT y la Cruz Roja. Podéis consultar más detalles del proyecto, e incluso contribuir ayudando a cartografiar zonas del tercer mundo, en el siguiente enlace: http://www.missingmaps.org/.

4) Empresa de servicios públicos (ESP)

El SIG es un componente estratégico en la infraestructura tecnológica de las empresas de servicios básicos o públicos. Estas empresas son las compañías de gas, teléfono, electricidad, agua y televisión por cable (denominadas en ocasiones *utilities*). Una sola compañía puede tener centenares o millones de clientes, varias redes y gran número de tuberías, o líneas, además de transformadores, postes de electricidad o teléfono representando billones de euros de infraestructuras instaladas.

Una compañía eléctrica, por ejemplo, en su proceso de distribución de energía eléctrica, depende en gran parte de la información geográfica. Al incrementar el volumen de datos espaciales que se generan, también aumenta la necesidad de estructurar esta información en un sistema que permita la administración, el almacenamiento y el procesamiento de datos. Es decir, un SIG.

Otro ejemplo sería la aplicación de un SIG a una compañía de gas donde, aparte de la gestión y localización de la red de tuberías y gasoductos, también interesa disponer de información espacial acerca del territorio por donde atraviesan estas infraestructuras, incluyendo los permisos y contratos de los terrenos particulares y públicos.

Además, se necesita guardar informes de todas las actividades, mantener información precisa sobre dónde está qué, mantener los datos actualizados, asignar las tareas diarias y proveer información a terceros, entre otras.

Ejemplo: eWise: coordinación y gestión de obras de servicios en la ciudad

ACEFAT, empresa creada en 1990 para desarrollar un proyecto de gestión integrada de las obras de servicios que se llevan a cabo en la vía pública de la ciudad de Barcelona, ha desarrollado eWise, un portal web que permite obtener de manera automática y en tiempo real información de servicios existentes en el subsuelo. La plataforma ayuda a prevenir riesgos laborales, así como roturas y cortes de suministros por obras nuevas (figura 44).

Figura 44. Plano con información de los servicios de Telefónica

Fuente: https://aguasdealicante.ewise.es/Wise/Login/AMAEM/Login.aspx.

5) Transporte

En el caso de transportes y logísticas la utilidad de un SIG es muy amplia, por ejemplo: un departamento de transportes necesita almacenar información del volumen de vehículos, el estado de todas las carreteras de una región, mantener el inventario de las señales de todas las vías, analizar datos de accidentes para localizar los llamados **puntos negros**; una compañía de logística necesita tener información de los vehículos y los paquetes: dónde se encuentran, cuándo llegarán, etc. Además, interesa planificar de manera eficaz las rutas de reparto; un operador de autobuses escolares necesita planificar de forma eficiente las rutas de las paradas.

Ejemplo: *Vull anar* – Transport Metropolitans de Barcelona (TMB)

Vull anar es una de las aplicaciones web de referencia en movilidad en el área metropolitana de Barcelona. Permite visualizar la información del servicio de Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB) sobre el territorio (figura 45). De manera intuitiva y sencilla, sitúa en el mapa las paradas de bus y metro, líneas y trayectos, y las rutas calculadas por el servicio *Vull anar*.

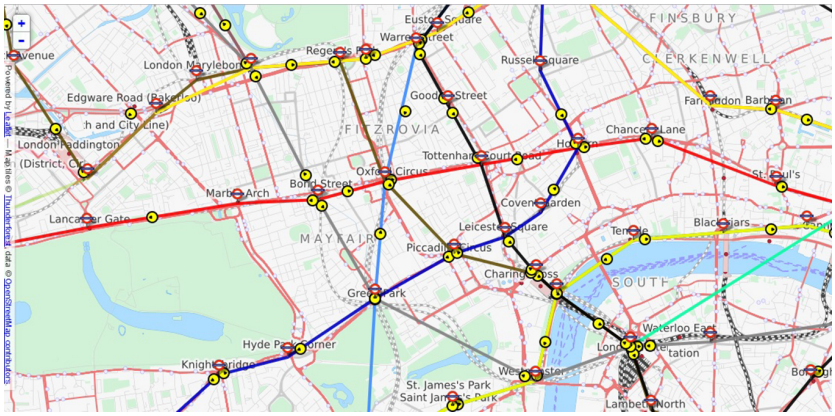
Figura 45. Aplicación para el cálculo de rutas óptimas con transporte público en el área metropolitana de Barcelona

Fuente: https://www.nexusgeographics.com/es/tmb-barcelona; https://maps.tmb.cat/es/vullanar.

Ejemplo: Live London Underground Map

La siguiente imagen (figura 46) muestra el mapa de Londres con la red de metro que se actualiza casi en tiempo real. Los puntos amarillos representan los trenes del metro, de manera que permite detectar cualquier incidencia en la línea de transporte. La aplicación permite el acceso a las líneas de autobús y a la red nacional de trenes del Reino Unido.

Figura 46. Mapa en tiempo real del metro de Londres



Fuente: https://traintimes.org.uk/map/tube/.

Ejemplo: Waze, la *app* de GPS gratuita y colaborativa para *smartphones*

Waze es una aplicación cien por cien móvil de navegación GPS, ligera y muy eficaz, bajo control de Google desde 2013. A medio camino entre red social y navegador GPS, Waze se describe como una comunidad de usuarios en busca de esquivar atascos.

Para ver información detallada en tiempo real, Waze se sirve básicamente de su comunidad de usuarios. Al abrir la *app*, se está participando de un trabajo colectivo. En la figura 47 podéis ver la interfaz de la aplicación donde se recogen todos los datos: velocidad, frenazos en seco, tiempos de los trayectos, etc.

Figura 47. Pantalla de ejemplo de las funcionalidades de Waze

Fuente: https://www.waze.com/es/.

6) Medio ambiente

El medio ambiente propició algunas de las primeras aplicaciones SIG, y de hecho fue una de las fuerzas motivadoras del desarrollo del primer SIG a mediados de los años sesenta.

En la actualidad, las aplicaciones SIG son de gran utilidad en la gestión del medio ambiente; van desde aplicaciones para la gestión de problemáticas ambientales hasta aplicaciones para la evaluación y valoración de impactos ambientales.

Estos sistemas se utilizan en proyectos de análisis multivariable, como en el caso de las evaluaciones de impacto ambiental, el diseño de alternativas, la determinación de localizaciones óptimas (por ejemplo, de parques eólicos), la construcción de puertos deportivos, nuevas urbanizaciones, campos de golf, etc. También, en estudios de impacto paisajístico, turístico, etc.

Ejemplo: Parque eólico de la sierra de la Auleda

Ya que hemos mencionado la temática de los parques eólicos, introducimos un ejemplo sobre el impacto ambiental que supone la implementación de un parque eólico formado por doce aerogeneradores en la sierra de la Auleda, en la población de La Junquera (Gerona).

Este proyecto, elaborado por el Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (SIGTE) de la Universidad de Girona, se centró en el impacto visual que tendría la presencia de los aerogeneradores, así como en determinar el número de ellos que se podría visualizar desde cada una de las poblaciones existentes en un radio de 15 kilómetros. Además, se calculó la visibilidad desde el trazado de la autopista (AP-7), así como de otros puntos de interés de carácter natural, patrimonial, arqueológico, etc. (Vicens y Orduña, 2004).

Este proyecto se caracteriza por el empleo de una potente herramienta SIG como es el análisis tridimensional para el estudio de diferentes impactos ambientales, en este caso

el impacto visual. La figura 48 muestra una captura de la sierra del Auleda en tres dimensiones junto con los aerogeneradores representados como un cilindro de color negro. En este caso, también vemos un elemento añadido a la representación como es la niebla.

Figura 48. Ejemplo de modelización del parque eólico de la sierra de Auleda. La imagen muestra los aerogeneradores representados como cilindros negros y la niebla

Fuente: SIGTE.

Ejemplo: Mapas de la polución del aire con nuevos sensores móviles – EDF, Environmental Defense Fund

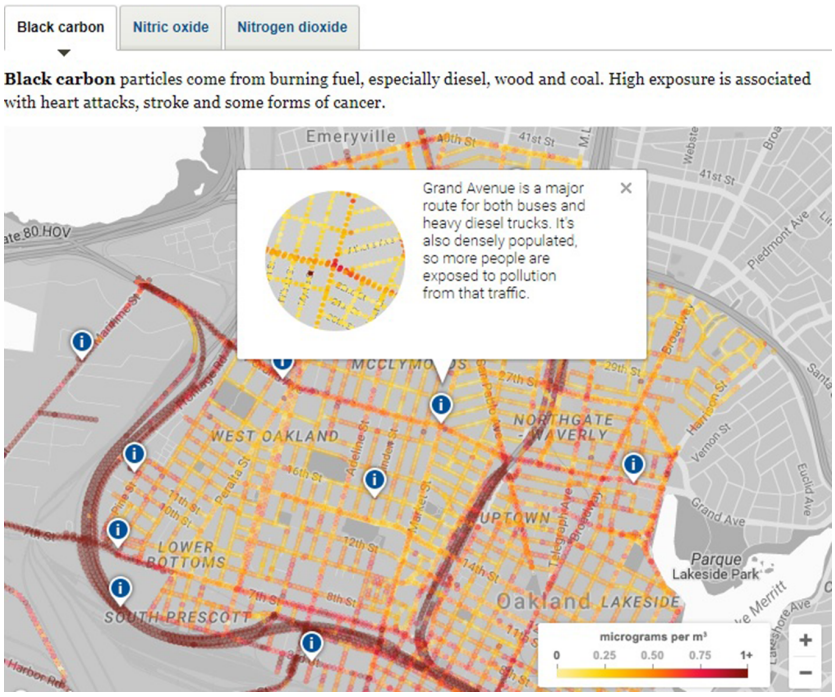
La contaminación del aire es peligrosa para la salud, pero no podemos verla y es difícil de medir. Para resolver este problema, EDF, junto con Google Earth Outreach, han desarrollado un equipo móvil de medición para evaluar la contaminación del aire a un nivel de detalle que era casi imposible anteriormente. Se han equipado los coches de Google Street View con los sensores de la plataforma AClima para la medición de CO_2, óxido nítrico y dióxido de nitrógeno. Estos sensores móviles permiten recopilar muchos más datos y a nivel de la calle, para dar una respuesta más adecuada a la realidad que la que se podía dar con los datos de sensores estacionarios repartidos por el territorio.

Componente temporal

La componente temporal de los datos es diferente en los datos que recogen los sensores fijos, que recogen datos de manera continua en un mismo sitio, que en los datos que se recogen mediante los sensores móviles que pueden corresponder a una o dos veces al día pero de muchos sitios diferentes.

La contaminación cartografiada de esta manera, tal como muestra la figura 49, permite un desarrollo más inteligente de las ciudades. La imagen muestra los datos relativos a la calidad del aire en Oakland (California) recogidos mediante sensores móviles. Los puntos de colores indican los niveles de polución del aire, de manera que los puntos de mayor contaminación se indican con los colores más oscuros. Así, se pueden identificar fácilmente zonas de alta polución cercanas a colegios o parques infantiles. De forma ampliada se muestran los resultados sobre Grand Avenue, una arteria principal de la ciudad con mucha circulación de autobuses y coches que concuerda con el alto índice de contaminación.

Figura 49. Mapa con datos de la calidad del aire recogidos por Google/Aclima para EDF



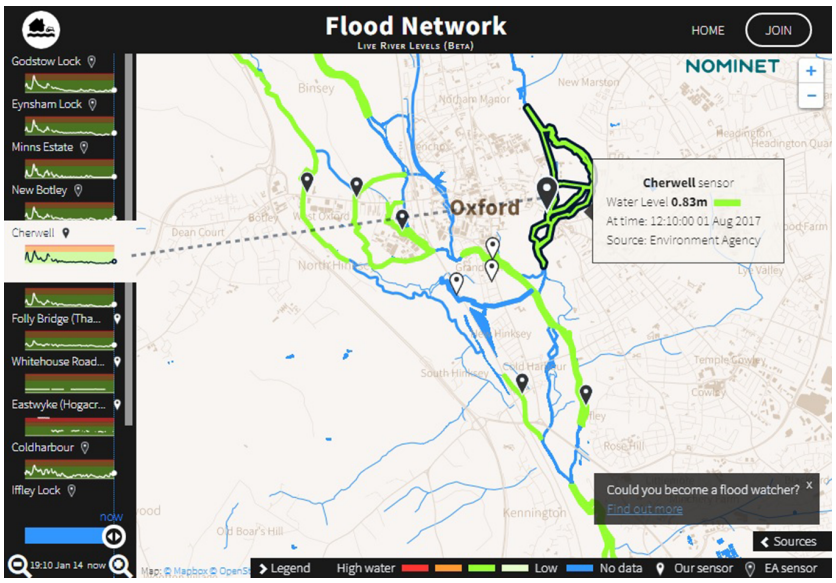
Fuente: https://www.edf.org/airqualitymaps.

Ejemplo: Flood Network – Building the Uk's biggest network of flood sensors (Red del caudal de los ríos: construcción de la mayor red de sensores para medir el caudal de los ríos)

En el Reino Unido, se ha desarrollado un proyecto (figura 50) que permite medir los niveles de agua en los ríos ingleses en tiempo real gracias al despliegue de toda una red de sensores en los ríos y en colaboración con la participación ciudadana (*flood watcher*). El objetivo es controlar y monitorizar las crecidas de los ríos para tomar las medidas oportunas en caso de posible inundación.

La aplicación muestra en color verde los tramos de los ríos con un nivel de caudal sin riesgo de inundación, y permite acceder a los datos en tiempo real de cada uno de los diferentes sensores ubicados en la cuenca del río. Los sensores pueden ser tanto de la Agencia de Medio Ambiente (EA, Environment Agency), representados con iconos negros, como de la Oxford Flood Network, representados con iconos blancos.

Figura 50. Seguimiento en tiempo real del nivel del caudal de los ríos



Fuente: https://map.flood.network.

Ejemplo: Faces of Fracking – Stories from the front lines of fracking in California (Las caras del *fracking*: historias desde la línea del frente en California)

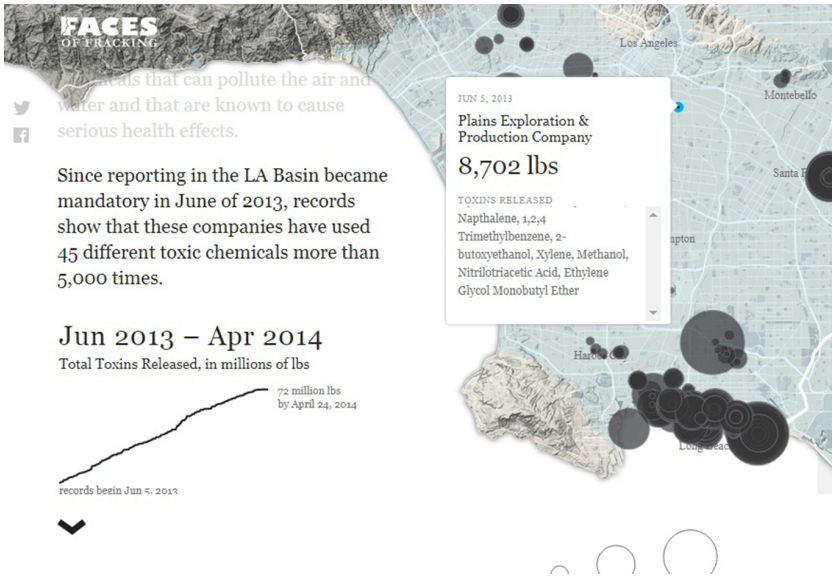
Fracking

El *fracking* es un método de extracción de gas natural y petróleo que consiste en someter a una fuerte tensión el subsuelo para fracturar la roca y recopilar el combustible.

Se sabe que muchos de los productos químicos utilizados en el proceso de *fracking* son dañinos para el cuerpo humano. Sin embargo, no está tan clara la evidencia que resalta las incidencias donde esos agentes químicos han hecho enfermar a las personas.

En la figura 51 podéis ver "Faces of Fracking", un proyecto de visualización de datos geográficos que cuenta historias personales vinculadas con los lugares donde se han efectuado perforaciones. Esta manera de mostrar la información es lo que se conoce como *storytelling*.

Figura 51. *Storytelling* sobre el *fracking* en California



Fuente: http://www.facesoffracking.org/data-visualization/.

7) Agricultura

En agricultura, aumenta el uso de mapas detallados e imágenes para planear los cultivos, analizar los campos y planificar aplicaciones eficientes de fertilizantes y químicos. Estas técnicas se conocen como **agricultura de precisión**, y permiten obtener beneficios en la calidad y cantidad de las producciones agrícolas.

Recoger información asociada a una localización específica en el campo (datos agrícolas georreferenciados) solamente es el principio para ayudar en la toma de decisiones para la mejora de la gestión y el aumento de la productividad. Una de las claves para aumentar el rendimiento económico de una explotación podría estar, por ejemplo, en el cálculo de la productividad de las parcelas según la cosecha y la estación. La principal razón para entender que el SIG es útil para los agricultores es hacer que estos mismos conozcan las propiedades de esta herramienta. El análisis de los datos recogidos en las explotaciones agrarias puede ayudar al agricultor en la toma de decisiones de tal modo que consiga incrementar la renta y reducir la responsabilidad ambiental.

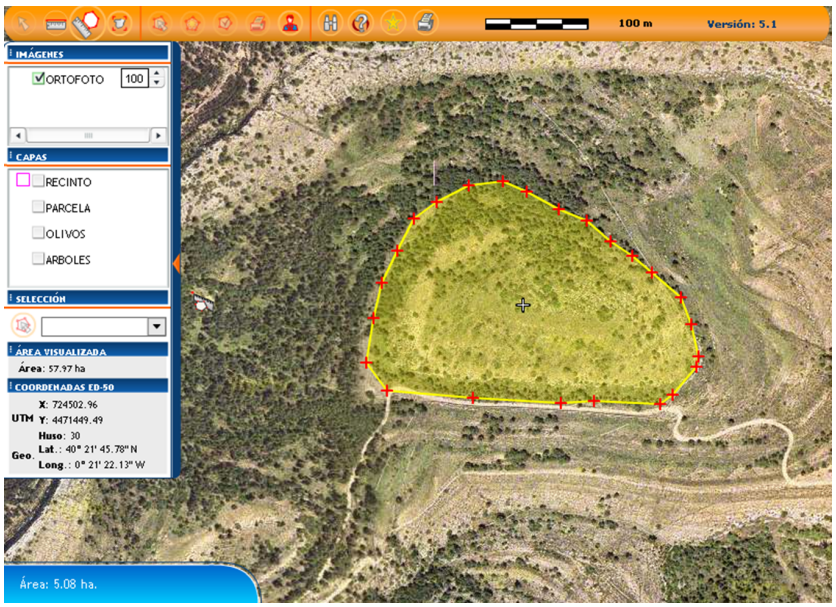
La información agraria introducida en un SIG puede ser muy diversa: información hidrológica, información edafológica, topográfica, de la orientación y demás características que el agricultor considere que tengan relación con la mejora de la productividad agrícola. Una vez tengamos toda esta información dentro de un SIG, se abre un amplio abanico de posibilidades de análisis espacial con el objetivo de obtener una mejora en el rendimiento de las tierras.

Ejemplo: SIGPAC: un SIG aplicado a la agricultura

Un ejemplo a gran escala para el control y gestión de parcelario agrícola sería el SIGPAC. El SIGPAC es un sistema de información geográfica dedicado al control de las ayudas agrícolas de la PAC (Política Agraria Común de la Unión Europea). Esta herramienta es de obligada utilización en la gestión de las ayudas comunitarias, y es la base que identifica cualquier tipo de ayuda relacionada con la superficie agrícola. Dispone de soporte gráfico del terreno, de las parcelas y recintos con usos o aprovechamientos agrarios definidos. (Para más información, visitar http://sigpac.mapa.es/fega/visor/). La aplicación permite visualizar cartografía topográfica y ortofotos según la escala de visualización, y editar mediante las herramientas básicas que contiene cualquier SIG: zoom, desplazamiento por el mapa, consulta de información y buscador. Además, está compuesto de un módulo de herramientas que permiten al usuario medir distancias y áreas, así como seleccionar atributos. En la figura 52 podéis ver un ejemplo sobre la edición de parcelas en línea mediante las herramientas de digitalización y medición que tiene la aplicación.

Entre los objetivos más importantes de esta herramienta SIG, se pueden destacar los siguientes: facilitar a los agricultores la presentación de las declaraciones de superficie, facilitar ayuda a la administración en el control de errores de la declaración y facilitar el control sobre el terreno agilizando el proceso de localización de las parcelas.

Figura 52. Interfaz del SIGPAC con la edición y cálculo de un área en concreto



Fuente: http://sigpac.mapa.es/fega/visor.

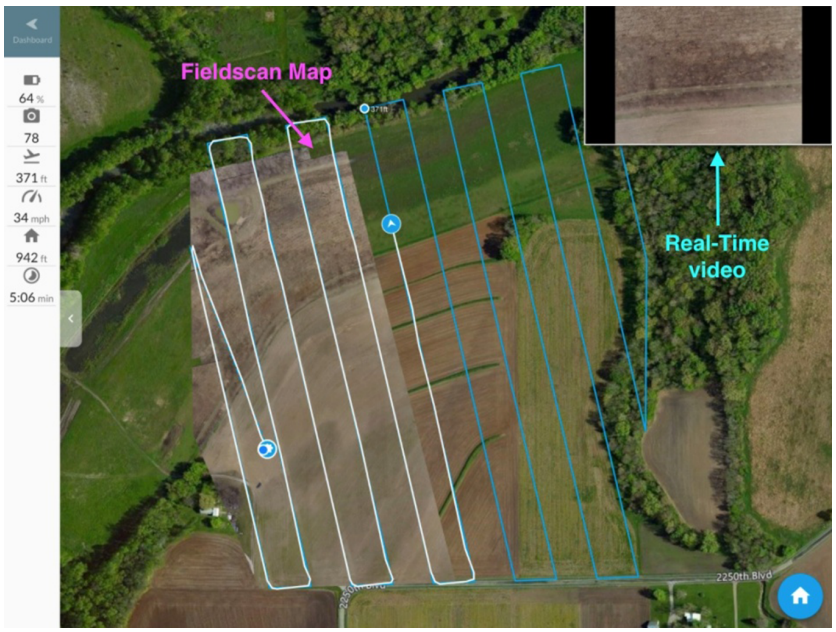
Ejemplo: FieldScanner – DroneDeploy

Desde que los aviones no tripulados (drones o UAV) empezaron a verse en las granjas, los agricultores han querido hacer mapas en tiempo real de sus campos de cultivo. Actualmente, FieldScanner permite generar mapas de los cultivos mientras el dron vuela por encima de los campos. La información capturada permitirá identificar y minimizar el impacto de plagas, enfermedades y otros problemas de los cultivos.

La figura 53 muestra la aplicación con el plan de vuelo del dron sobre uno de los campos de cultivo en la que se puede ver en tiempo real la información capturada.

Este proyecto es un ejemplo claro de cómo el uso de nuevos métodos de captura de datos, como son los drones, proporcionan flujos dinámicos para la creación de cartografía en tiempo real y toma de decisiones en ámbitos como la agricultura, donde no era habitual.

Figura 53. Plan de vuelo con FieldScanner sobre un campo de cultivo



Fuente: https://www.dronedeploy.com/fieldscanner.html.

8) Vehículos no tripulados

En el apartado anterior hemos visto un proyecto donde los datos capturados por aviones no tripulados permiten la creación de cartografía en tiempo real en proyectos de agricultura de precisión.

Cuando hablamos de vehículos no tripulados, se hace referencia también a los coches autónomos que necesitan de datos LIDAR y RADAR para generar una visión por computador fiable y segura. Los coches autónomos disponen de sensores y software diseñados para detectar peatones, ciclistas, vehículos, obras en la carretera, etcétera, en un radio de distancia suficiente como para poder predecir la ruta con suficiente antelación.

LIDAR

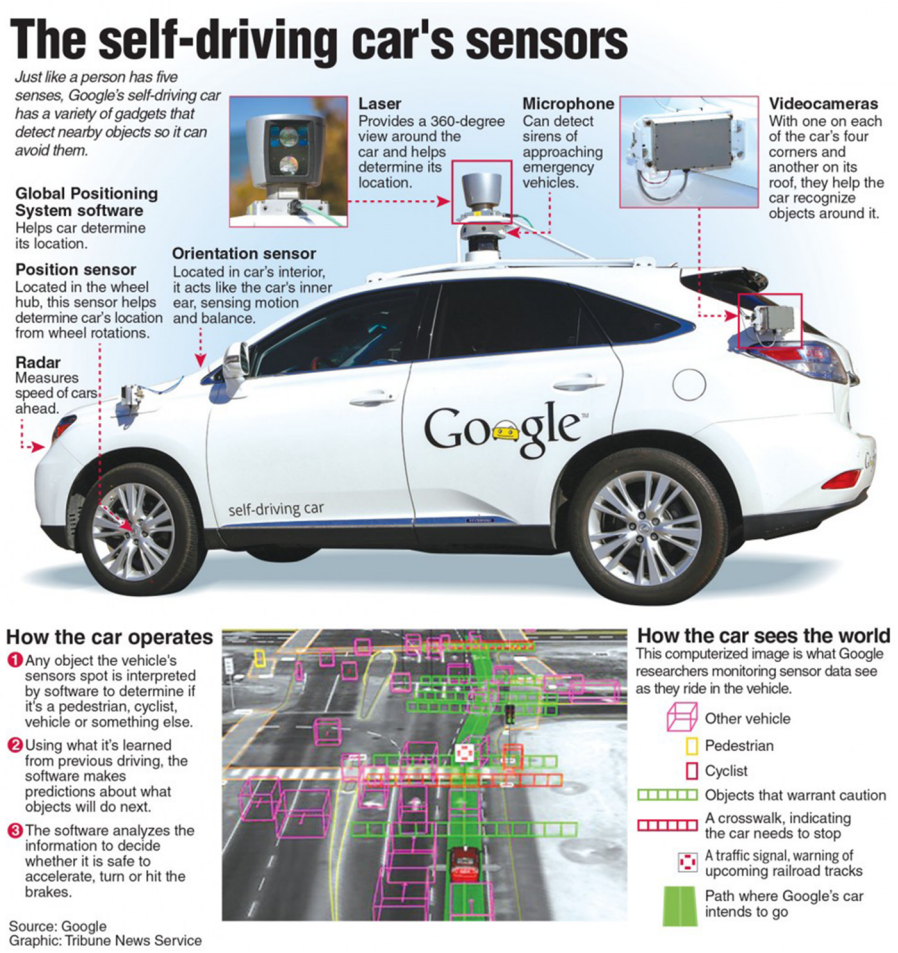
Un LIDAR (acrónimo del inglés: *laser imaging detection and ranging*) es un dispositivo que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado.

El proyecto Waymo, desarrollado por Google, el proyecto Autopilot de TESLA, o el prototipo de UBER son sólo algunos ejemplos de esta nueva tecnología que está en plena expansión. En la figura 54 podéis ver el conjunto de sensores instalados en un coche autónomo.

RADAR

Un RADAR es un sistema de detección de objetos empleado en aeronáutica, navegación y astronomía, que sirve para indicar la presencia de un objeto y determinar la distancia a la que se halla mediante la emisión de ondas especiales de altísima frecuencia reflejadas en él.

Figura 54. Sensores instalados en Waymo, el coche autónomo de Google



Fuente: Google Self-driving.

9) *Geo big data*

Big data es un concepto que hace referencia a las actividades relacionadas con los sistemas que manipulan grandes conjuntos de datos, por tanto, *geo big data* podemos entenderlo como el *big data* de los datos georreferenciados. El despliegue masivo de sensores en las ciudades permite la geolocalización de múltiples fenómenos que hay que analizar y entender para que nuestras ciudades sean realmente inteligentes. Es necesario implementar nuevos mecanismos de almacenamiento y análisis de grandes volúmenes de datos para poder obtener información fiable. Un ejemplo de empresa geoespacial que ha apostado por proyectos con *big data* es Carto.

Incluso desde la administración se ha tomado conciencia de la ventaja que supone el análisis masivo de datos y de cómo pueden ayudar a los ciudadanos.

Ejemplo: El impacto económico del Mobile World Congres (MWC)

El impacto económico de la conferencia del MWC en Barcelona se estima en más de 300 millones de euros, convirtiéndolo en uno de los eventos anuales más importantes de la ciudad.

Con el fin de mostrar el impacto económico real del MWC en la ciudad y utilizando la tecnología de *big data*, el BBVA analizó millones de transacciones de tarjetas de crédito y terminales durante un período de dos semanas.

Dividiendo los datos en transacciones de la semana anterior y la semana durante la conferencia, se creó una visualización temporal usando HTML y Torque (Carto), para posteriormente mostrar esos mismos millones de transacciones por gasto local y gasto extranjero, topográficamente, sobre Barcelona.

La figura 55 muestra una captura de pantalla de la visualización dinámica de estas transacciones. Las zonas de color blanco muestran los puntos de mayor consumo y describen el movimiento de las tarjetas a lo largo de las Ramblas a medida que avanza la noche.

Figura 55. Análisis visual de millones de transacciones de tarjetas de crédito durante la celebración de la edición 2012 del MWC en la ciudad de Barcelona

Fuente: www.mwcimpact.com.

4.2. Cómo trabajamos en SIG

Hemos visto campos de aplicación de los SIG, pero vamos a ver ahora cómo insertamos los SIG en las organizaciones, qué supone su incorporación y qué aspectos debemos tener en cuenta para ello.

Normalmente, los SIG se introducen en una organización en el marco de un único proyecto. En organizaciones mayores pueden desarrollarse varios proyectos en paralelo. Tan pronto como los beneficios de la utilización de los SIG se hacen patentes en un departamento, pueden incorporarse a otros departamentos dando como resultado un SIG corporativo.

> Cuando se acepta el SIG y la organización se da cuenta que esto repercute en ahorro de dinero, colaboraciones y reutilización de recursos, puede desarrollarse un amplio SIG empresarial o corporativo (Longley y otros, 2001).

De esta forma, Tomilson (2003) diferencia tres tipos de proyectos SIG en cuanto a su papel dentro de una organización:

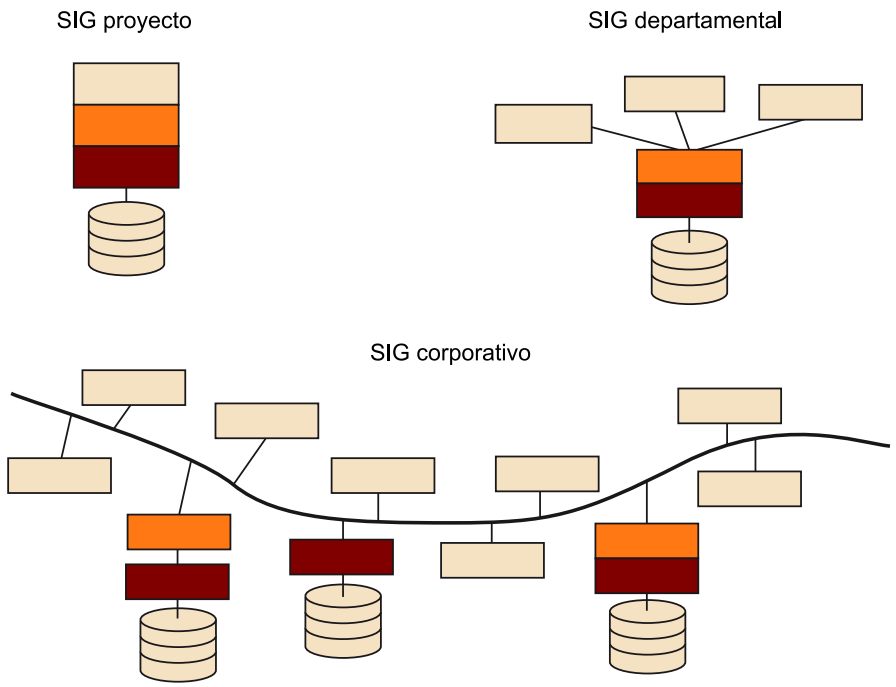
1) Proyectos de propósito particular, que tienen un calendario bastante acotado en el tiempo y no suelen contar con un sistema de apoyo a largo plazo. El estudio de localización óptima de un vertedero sería un ejemplo de este tipo de proyectos. Es la estructura que responde al "SIG proyecto" que vemos en la figura 56: estructura vertical simple.

2) Aplicaciones de nivel departamental. En este caso, existe como mínimo un objetivo de negocio o estratégico relacionado con la organización. No se trata de un sistema de apoyo a las funciones u objetivos estratégicos generales de la organización a largo plazo, pero sí de una necesidad concreta. Un ejemplo en este caso sería un departamento de planificación de un ayuntamiento, que usa SIG para generar listados de propietarios de fincas de más de 1000 m^2 a quienes les afectaría una ordenanza municipal específica. Es la estructura de proyecto SIG que responde al "SIG departamental" de la figura 56: estructura vertical simple de donde salen diferentes resultados.

3) Sistemas corporativos en el ámbito multidepartamental (también llamado SIG institucional, de empresa, organizativo o regional). Son aquellos que permiten a los miembros de una organización acceder a un SIG integrado, con datos transversales y comunes a diferentes departamentos. En este caso se trata de un SIG que responde a las necesidades generales de la organización, por lo que se convierte en una herramienta poderosa dentro de la organización y está alineado con su misión. En este caso, es esencial un sistema de soporte específico y a largo plazo. Un ejemplo en este caso sería una empresa de transporte que implementa un SIG y múltiples aplicaciones en torno a éste,

compartiendo bases de datos espaciales entre departamentos. Es la estructura de proyecto SIG que responde al "SIG corporativo" de la figura 56: estructura horizontal compleja que integra a toda una organización.

Figura 56. Configuración de implementación SIG



Fuente: adaptado de Longley y otros (2005).

Los principios que rigen en todos los casos son los mismos. Los SIG han sido y serán siempre un sistema de información (que maneja datos georreferenciados), por lo que su proceso de implementación, protocolos y arquitectura serán comunes. Un SIG tiene datos, clientes, servidor y trabaja sobre redes. En el caso de los proyectos SIG que hemos comentado la diferencia residirá en la complejidad de elementos que entrarán en juego, así como de estrategias para llevarlos a cabo. En nuestro caso, tomaremos como referencia el SIG corporativo ya que es el que conlleva la máxima diversidad de casuísticas (figura 56).

Las organizaciones adoptan el SIG con la asunción de que éste les hará su trabajo más fácil, económico o mejor con vistas a sus clientes (o electores). Y esto puede ser cierto, pero a menudo la fe en la tecnología es ciega, de modo que se olvidan aspectos mucho más importantes como: personal cualificado, un estudio previo a la incorporación del SIG o la elección de las herramientas SIG adecuadas según los objetivos del proyecto.

El gran reto de introducir un SIG en una organización no reside en el aspecto tecnológico ni incluso financiero, sino en los aspectos organizativo y formativo. La tecnología cada vez cubre y satisface más las necesidades del usuario y, además, a un coste cada vez más asequible, pero son los factores humanos los que mantienen un condicionante más importante (Comas y Ruiz, 1993).

Solo cuando la tecnología está plenamente integrada en una estructura organizativa aparecen beneficios reales.

Entender qué hace la empresa y cuáles son sus planes de futuro permite al gestor SIG diseñar un proyecto de implementación directamente relacionado con los objetivos reales que se pretenden y estar en línea con la organización, minimizando el riesgo a perder el tiempo en planificar aquello que pudiera ser periférico a las necesidades reales.

4.2.1. Metodología de desarrollo de un SIG

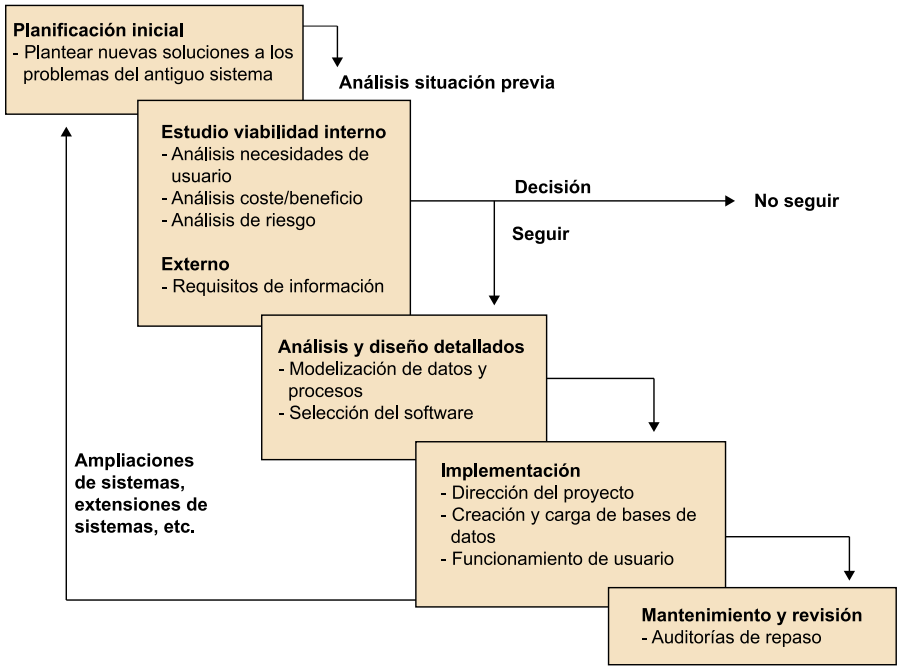
Una vez tenemos claro que es positivo implantar un SIG en la organización, el siguiente paso será diseñar una metodología (o plan) para su desarrollo.

En la figura 57 tenemos una metodología para la implementación de un SIG en una organización. Los que ya hayáis estado involucrados en alguna forma de planificación comprenderéis que diagramas como los de la figura 57 necesitan ser tomados con un poco de precaución. La planificación, en realidad, es mucho más que un proceso ordenado que se puede simplificar en tales diagramas. Hay tareas que se deberían hacer en serie y otras que se deberían hacer en paralelo; hay tareas que se terminan, aunque sea en un orden incorrecto y algunas que no se terminan del todo.

A pesar de todos estos imponderables, partiremos del diagrama de la figura 57 para explicar las ideas básicas sobre cómo debería desarrollarse un SIG en una organización. El tema es mucho más complejo que lo que veremos aquí y daría para una asignatura completa; aquí sólo os damos unas pinceladas para dar los primeros pasos en la implantación y desarrollo de un SIG. En la metodología propuesta veremos los siguientes puntos:

- Planificación inicial.
- El estudio de viabilidad.
- Análisis y diseño detallados.
- Implementación.
- Mantenimiento y revisión.

Figura 57. Propuesta de metodología SIG para su implementación en una organización



Fuente: adaptación a partir de los materiales del módulo "SIG en organizaciones", del Programa UNIGIS Girona.

La planificación inicial

El interés inicial por un sistema de información puede tener varios orígenes como, por ejemplo, ayudar en la gestión y organización de una entidad u optimizar al máximo los servicios de esta entidad. Las presiones por cambiar se dan cuando los empleados se frustran con los medios disponibles para realizar su trabajo o saben que hay herramientas que les pueden facilitar el trabajo. En relación con el SIG, Aranoff (1989) sugiere cinco áreas problemáticas que pueden incitar al descontento general con los métodos actuales en el contexto de una organización, por ejemplo, un ayuntamiento:

- La información espacial está caducada o tiene una calidad muy baja, de manera que los mapas y los listados de propiedades están seriamente anticuados.

- Los datos espaciales no se almacenan en formatos estándar, así que la precisión de los datos cartografiados oscila; además, varios departamentos recogen y gestionan los mismos datos espaciales.

- Los datos no se comparten, por problemas legales, de confidencialidad, y a veces por el simple celo de cada departamento en insistir que "aquella información es suya y sólo suya".

- Las herramientas de análisis y de representación no son las adecuadas.

- La organización demanda *outputs* (salidas de datos) que los sistemas de información de los que disponen no pueden generar.

Una vez identificadas estas carencias primarias en el sistema, se pasa a la elaboración de un primer texto de planificación que vendrá a ser un análisis de la situación previa al desarrollo del estudio de viabilidad (figura 57).

El estudio de viabilidad

Si la presión de introducir un SIG es suficientemente fuerte para persuadir a los jefes administrativos de que existen garantías de mejorar la gestión, seguramente el siguiente paso será encargar el diseño a un "grupo de trabajo". En este punto entraremos a analizar con más detalle todos los procesos, tanto internos como externos, que ayudarán a entender por qué necesitamos un SIG en nuestra organización.

Cuando hacemos referencia a los **procesos internos**, hacemos hincapié en la investigación de aspectos relacionados con el análisis de las necesidades del usuario, con el análisis coste/beneficio y con el análisis del riesgo:

a) Análisis de las necesidades del usuario: consiste en determinar cuáles son las demandas para el SIG a partir de entrevistas, cuestionarios, la observación de procesos de trabajo existentes y del análisis del flujo de datos.

b) Análisis coste/beneficio: es la técnica que pretende evaluar costes y beneficios sobre unas bases comunes y así hacer posible las comparaciones directas de los beneficios netos derivados de propuestas ampliamente dispares.

c) Análisis de riesgo: es la estimación del riesgo de que las cosas vayan mal. Debemos considerar las consecuencias del fallo. Si el SIG fracasa, ¿cuáles serían las consecuencias para la empresa (y para nuestro trabajo)?

En lo que se refiere a los **procesos externos**, hacen referencia al ambiente externo. Es decir, se puede aprender mucho de los éxitos (y de los fallos) de las empresas pioneras. De su política de hardware, software y de su relación con los suministradores de datos. Los contactos con los aspectos externos pueden acortar el tiempo de desarrollo y ayudar a evitar que se repitan los costosos errores de otros. Un peligro a eliminar, dentro de la empresa, es el hábito de centrarse demasiado rápidamente sólo en unos temas determinados como, por ejemplo, la elección del software SIG o el tipo de lenguaje de programación que se utilizará.

Después de este análisis el grupo de trabajo presenta sus conclusiones (estudio de viabilidad) al comité directivo. Si la decisión es que el SIG no ha sido presentado con suficiente fuerza como para autorizar la inversión, el proyecto SIG terminará aquí. Sin embargo, si la decisión es proseguir, continuaremos con los pasos que siguen en la figura 57: análisis y diseño detallados, implementación, y mantenimiento y revisión.

Análisis y diseño detallados

El propósito de los estadios anteriores ha sido, esencialmente, crear dudas sobre si el sistema SIG era necesario y analizar su viabilidad. Pero ahora la decisión ha sido proceder con el proyecto, de manera que el énfasis se traslada a desarrollar el SIG más apropiado. El énfasis se ha trasladado desde la viabilidad ("¿Estamos construyendo el sistema correcto?") a la elaboración y verificación ("¿Estamos construyendo correctamente el sistema?").

Bajo el título de "Análisis y diseño detallados" que sigue en la figura 57, consideraremos los siguientes pasos a seguir:

a) Modelado de los datos y del proceso: a partir del estudio de necesidades del usuario, el grupo de trabajo habrá establecido una apreciación de los productos que debe generar el SIG, los datos necesarios y los procesos a efectuar. Por lo tanto, será necesario realizar un proceso detallado de modelación espacial para determinar qué entidades espaciales se necesitan dentro del sistema, cómo va a representarse cada entidad y cómo cada una de estas entidades se va a relacionar con las otras.

b) Selección de software: si una empresa desea implantar o modificar un sistema de información convencional, o tiene técnicos familiarizados con el tema, o bien sus SI preexistentes condicionan mucho las nuevas adquisiciones de software (podemos decidirnos por una u otra elección). Para la adquisición de un SIG, en cambio, estas condiciones no se pueden aplicar tan fácilmente. En muchas organizaciones el SIG será una nueva tecnología y, en consecuencia, no existirán las habilidades internas para guiar la selección. Además, hay una amplia gama de productos software basados en modelos fundamentalmente diferentes y con una gran variación de funciones (todas ellas enmascaradas bajo el nombre de "SIG"). Es muy fácil hacer una mala elección.

Implementación

Basándonos en la figura 57, al final de la etapa de diseño y de análisis detallado, el grupo de trabajo sabrá con gran detalle la naturaleza del SIG requerido. El siguiente trabajo es asegurarse de que los planes tienen su fruto, de manera que acaben con un sistema exitoso.

En gran medida, la implementación se puede ver como un problema de programación y de dirección de proyecto. Aquí simplemente perfilaremos algunas de las inquietudes más importantes:

a) Dirección del proyecto: como en cualquier otro proyecto, el director necesita establecer un plan de implementación, identificar las etapas más importantes y planificar las cosas para asegurar los recursos necesarios para cada etapa.

b) Creación y carga de la base de datos: dentro de la puesta en marcha, la creación de la base de datos es una etapa decisiva (lleva mucho tiempo y es muy costosa). Contratiempos, falsos inicios y pérdidas de tiempo durante la fase de creación de la base de datos pueden causar pérdida de apoyo de la dirección. Un experimentado director de proyecto, por consiguiente, prestará una particular atención a establecer conversiones de datos y planes de integración apropiados y realistas.

c) Funcionamiento de usuario: es un período crítico en la vida de un sistema. En este punto, el sistema empieza a afectar a la vida cotidiana de la organización, de manera que las realidades políticas y humanas serán las que finalmente determinarán el éxito del sistema. Si la integración de un nuevo sistema dentro de una organización se hace de una manera insensible, las perspectivas del sistema se dañarán irreparablemente. En consecuencia, el equipo del proyecto debe esforzarse por educar al usuario.

Además, debe optarse entre una implementación "revolucionaria" (donde se suspende el viejo sistema manual y el SIG arranca solo) o establecer un período de "funcionamiento paralelo" hasta que los usuarios tengan confianza en el nuevo sistema. Existe la alternativa de tener una "fase de funcionamiento" en donde las diferentes partes del nuevo sistema se van introduciendo sucesivamente (en etapas). A veces, el proceso de mantener y/o corregir dos sistemas activos al mismo tiempo, así como formar a los usuarios en el nuevo sistema, conlleva un gran esfuerzo en inversión de tiempo que se traduce en más inversión económica de la prevista.

Mantenimiento y revisión

Finalmente, un sistema de información nunca es estable. El hardware y el software rápidamente se desfasan, de manera que deben preverse actualizaciones a lo largo del tiempo. Los cambios en las necesidades del usuario y los fallos y carencias en el diseño inicial pueden llegar a ser muy evidentes. El proceso de desarrollo de los sistemas nunca acaba y éstos deben ser evaluados periódicamente.

También existe la necesidad de llevar a cabo auditorías formales para ver la salud del sistema. Las auditorías proporcionan la oportunidad de recuperar los documentos originales para contrastar las estimaciones iniciales (costes, beneficios...) con los resultados actuales. Las auditorías también constituyen una oportunidad de reconocer formalmente los resultados inesperados que no fueron anticipados durante las propuestas originales.

Por último, las auditorías pueden anticipar y representar gráficamente el nivel de desarrollo del sistema para confluir en los cambios de necesidades de la organización.

4.3. Implicaciones sociales de los SIG

Las tecnologías de la información espacial y sus productos tienen implicaciones en los procesos de toma de decisiones de las sociedades. El aumento del uso de los SIG puede tener un gran impacto en temas de interés social.

Algunos de los efectos principales del uso de los SIG en las sociedades son:

- Consecuencias políticas de la adopción de los SIG.
- Fórmulas de planificación basadas en análisis SIG.
- Reestructuración de las actividades económicas.
- Racionalización de la planificación.
- Influencia en estructuras legales de la sociedad.

En los años ochenta y noventa los SIG, los datos espaciales y los sistemas de tratamiento de imágenes llegaron a ser elementos centrales en la reestructuración de la vida social de organizaciones públicas y privadas. Algunos opinan que la revolución del procesado de datos espaciales y los sistemas de imagen digital ofrecieron nuevas oportunidades para la construcción de sociedades informadas e interesadas en la planificación racional y eficiente. Otros piensan que los nuevos sistemas de conocimiento provocaron serios problemas de libertad, sociedad civil y práctica democrática.

Lectura complementaria

Para más información sobre las distintas opiniones de la influencia de las tecnologías en la sociedad:

D. Sui; M. Goodchild (2003). "A tetradic analysis of GIS and society using McLuhan's law of the media". *The Canadian Geographer* (vol. 47, n.º 1, págs. 5-17).

El hecho es que los SIG han llegado a ser un elemento significativo en la reestructuración de las vidas públicas y privadas. En realidad, están siendo cruciales para preguntarse qué impactos tienen estas tecnologías y aplicaciones en el modo en que las personas interactuamos entre nosotros.

Es por estos motivos que la comunidad SIG llama a la elaboración de un código ético, para probar de dar respuesta a todas estas tendencias y dudas que surgen de la utilización de los SIG.

4.3.1. El código ético de los SIG

Un código ético pretende guiar a los profesionales SIG y ayudarles a que sus elecciones sean apropiadas y éticamente correctas.

El profesional SIG debe ser consciente del impacto de su trabajo en la sociedad en conjunto, en grupos sociales que incluyen minorías geográficas y demográficas, en las generaciones futuras, en los diferentes campos sociales, económicos, ambientales y técnicos. Además, como técnico SIG deberá reconocer las consecuencias que su trabajo puede tener en las personas, y evitar causar daños o perjuicios en sus vidas.

Pero ¿quién se encarga de marcar estas pautas? ¿Quién se encarga de regular lo qué es ético y lo que no lo es en la comunidad SIG?

Pues bien, la comunidad SIG es tan nueva que los códigos de conducta todavía no han sido desarrollados u ofrecidos a los profesionales. Sin embargo, muchos grupos estrechamente relacionados con los SIG ya han desarrollado sus códigos de conducta, y esto favorece al desarrollo del código ético de los SIG.

Por ejemplo, algunos códigos de conducta que pueden ser relevantes para la comunidad SIG son aquellos preparados por la ACM (The Association of Computing Machinery, Asociación de la Maquinaria Informática), la DPMA (The Data Processing Management Association, Asociación para la Gestión del Procesado de Datos), el ICCP (The Institute for Certification of Computer Professionals, Instituto para la Certificación de Ordenadores Profesionales), y aquellas organizaciones que regularmente patrocinan conferencias en temas de SIG.

También existen otros códigos de conducta que sirven para el desarrollo ético de los SIG. Éstos serían los vinculados a la utilización de la tecnología y su responsabilidad moral que podemos encontrar en algunos documentos como, por ejemplo, en *The Mount Carmel Declaration* (Kranzberg, 1980, pág. 227).

Los códigos elaborados por estas organizaciones pueden ofrecer buenos modelos para que la comunidad SIG pueda utilizar sus propios códigos de conducta. Es el caso de URISA (The Urban and Regional Information Systems Association, Asociación de los Sistemas de Información Urbanos y Regionales), que establece que las obligaciones profesionales del SIG frente a la sociedad son:

- Realizar el mejor trabajo posible.
- Contribuir a la comunidad de la forma más extensa, viable y aconsejable.
- Hablar claro de los diferentes temas y obligaciones frente a los individuos.
- Respetar la privacidad.
- Respetar a las personas.

Glosario

análisis espacial *m* Es un análisis que se fundamenta en los aspectos principales de las herramientas lógicas que conforman un sistema de información geográfica como, por ejemplo: superposición de capas de información, construcción de modelos tridimensionales del terreno y operaciones que permiten la transformación de escalas y coordenadas.

análisis multivariable *m* Es un método estadístico para la evaluación de las relaciones entre dos o más variables.

atributo *m* Es la información acerca de una entidad geográfica en un sistema de información geográfica. La información se almacena normalmente en una tabla que está enlazada a la entidad por un único identificador. Por ejemplo, los atributos de un río pueden incluir el nombre, la longitud y sedimentos por dm^3/s.

capa *f* Es la representación visual de la información geográfica en un mapa digital. Concretamente, una capa es una porción o estrato de la realidad geográfica de un área particular. Por ejemplo, en un mapa de carreteras, los parques nacionales, fronteras políticas y los ríos son representados en diferentes capas.

catastro *m* Es un registro administrativo del Estado en el que principalmente se describen los bienes inmuebles rústicos y urbanos.

data warehouse *m* Es un sistema de información que almacena gran cantidad de información. Permite hacer consultas rápidas y eficientes, y modificar y analizar información de la base de datos.

datos alfanuméricos *m pl* Es información nominal y numérica. Los SIG están compuestos de una base de datos con información alfanumérica.

datos geográficos *m pl* Son datos con información geográfica.

digitalización *f* Es el proceso de convertir elementos geográficos de un mapa analógico a un formato digital usando tabletas digitalizadoras, o bien de un formato digital a otro formato digital mediante la digitalización en pantalla.

escala de un mapa *f* Es la relación matemática que existe entre las dimensiones reales de un territorio y las del mapa que representa este territorio.

espectro electromagnético *m* Es la distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas (radiación electromagnética) que emite o absorbe una sustancia.

geodesia *f* Es una rama de las geociencias y una ingeniería. Engloba las técnicas para la representación de la superficie de la Tierra, global y parcial, con sus formas naturales y artificiales.

geomática *f* Es un conjunto de ciencias que integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica.

geografía *f* Es la ciencia que estudia la descripción y la representación de la Tierra en la configuración de su superficie y en la distribución espacial de los distintos fenómenos, especialmente cuando se relacionan con la presencia y la actividad humana.

georreferenciación *f* Es un sistema utilizado para definir la localización de un objeto espacial en un sistema de coordenadas.

gestión territorial *f* Es una técnica administrativa, influida principalmente por la geografía y ciencias ambientales, que tiene como objetivo la ocupación racional del territorio mediante la aplicación de normativa que regule unos determinados usos del suelo.

imágenes satélite *f pl* Son la presentación visual de la información capturada por un sensor situado en un satélite artificial.

imágenes digitales *f pl* Son imágenes capturadas por un sensor electrónico que dispone de unidades fotosensibles y se archivan en otro elemento electrónico llamado memoria.

mesa digitalizadora (o tableta digitalizadora) *f* Es un dispositivo periférico del ordenador que permite dibujar (o digitalizar) los elementos o entidades geográficas.

modelización *f* Es una técnica que consiste en la generación de modelos de elementos geográficos.

modelo digital del terreno *m* Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua como puede ser la temperatura, por ejemplo.

modelo digital de elevación *m* Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable concreta: la altura.

ortofoto *f* Es una fotografía del territorio donde todos los elementos presentan la misma escala. Han sido eliminados todos los errores y deformaciones debidos a la esfericidad de la tierra.

plotter *m* Es un dispositivo de impresión conectado a un ordenador y diseñado para trazar gráficos vectoriales, en este caso mapas.

proyección geográfica *f* Es un sistema que convierte la superficie esférica de la tierra en una superficie plana.

raster *f* Es una estructura de datos representados en una matriz de celdas regulares donde cada una almacena información geográfica.

sensores remotos *m pl* Son unos dispositivos situados en los satélites artificiales que detectan la radiación natural emitida o reflectada por la superficie de la tierra.

sistema *m* Es un conjunto de elementos interrelacionados entre sí.

sistema de ayuda a la toma de decisiones (espaciales) *m* Es un conjunto de procesos mediante los cuales se realiza una elección entre las alternativas o formas para resolver diferentes situaciones del proyecto.

sistema de coordenadas *m* Es una estructura de referencia que consiste en un conjunto de puntos, líneas, polígonos y un conjunto de normas, utilizadas para definir la posición de los puntos en el espacio en cualquier dos o tres dimensiones. Los sistemas de coordenadas más usados para la superficie de la tierra son el sistema de coordenadas cartesiano y el sistema de coordenadas geográfico.

tecnologías de la información geográfica *f pl* Son unas tecnologías que se encargan del estudio, desarrollo, implementación, almacenamiento y distribución de la información geográfica mediante la utilización de hardware y software como medio de sistema informático.

topografía *f* Es la ciencia que estudia el conjunto de principios y procedimientos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie de la Tierra.

topología *f* Es una disciplina matemática que estudia las propiedades de proximidad, conectividad, compacidad, textura, metricidad, etc. de las entidades.

vectorial *f* Es una estructura de datos que representan la realidad a través de puntos, líneas y polígonos.

Bibliografía

Bibliografía básica

Bosque, J. (1997). *Sistemas de Información Geográfica* (2.ª ed.). Madrid: Ediciones Rialp, S. A.

Chrisman, N. R. (2003). *Exploring Geographical Information Systems* (2.ª ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

Goodchild, Michael F. (1997). "What is Geographic information Science?". NCGIA Core Curriculum in GIScience. National Center for Geographic Information and Analysis, University of California.

Gutiérrez Puebla, J.; Gould, M. (1994). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Ed. Síntesis.

Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W. (2001). *Geographic Information Systems and Science* (1.ª ed.). Chichester, UK: John Wiley and Sons.

Longley, P. A.; Goodchild, M. F.; Maguire, D. J.; Rhind, D. W. (2005). *Geographic Information Systems and Science* (2.ª ed.). Chichester, UK: John Wiley and Sons.

Malcolm, B.; Megías, D.; Pérez, A. (2007). "Software libre y sistemas de información geográfica: conceptos, definiciones y aspectos legales". I Jornadas de SIG libre, Gerona, 2006. ISBN: 978-84-690-38869.

Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica* [en línea]. <http://volaya.github.io/libro-sig/>.

Peña Llopis, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Alicante: Editorial Club Universitario.

Bibliografía complementaria

Aronoff, S. (1989). *Geographic Information Systems: a management perspective*. Ottawa: WDL Publications.

Bertin, J. (1967). *Sémiologie Graphique*. París: Editions Gauthier-Villars.

Bosque, J.; Ortega, A.; Rodríguez, V. (2005). "Cartografía de riesgos naturales en América Central con datos obtenidos de Internet". *Documents d'Anàlisi Geogràfica* (nº 45, págs. 41-70). ISSN 0212-1573. Barcelona.

Burrough, P. A.; McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographic information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon.

Carter, J. R. (1989). "On defining the geographic information system". En: W. J. Ripple (ed.). *Fundamentals of geographic information systems: a compendium*. Falls Church Virginia: ASPRS/ACSM.

Comas, D.; Ruiz, E. (1993). *Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*. Barcelona: Editorial Ariel.

DeMers, M. (2001). *GIS Modeling in Raster*. Hoboken, NJ: Wiley & Sons.

Deuker, K. J.; Kjerne, D. (1989). "Multipurpose Cadastre Terms and Definitions". *Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping* (pág. 12). Falls Church, VA.

Felicisimo, A. M. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales* Oviedo: Pentalfa.

Guimet, J. (1992). *Introducción conceptual a los sistemas de información geográfica*. Madrid: Estudio Gráfico Madrid, S. L.

Hruby, F.; Castillo-Aja, R.; Valdivia Ornelas, L. (2015). "La visualización del tiempo: de los sistemas de información geográfica a la animación cartográfica" [en línea]. *Ciencias Espaciales* (vol. 8, n.º 2, págs. 97-112). DOI: 10.5377/ce.v8i2.2071. <https://www.researchgate.net/publication/282467666_La_visualizacion_del_tiempo_de_los_sistemas_de_informacion_geografica_a_la_animacion_cartografica>.

Kranzberg, M. (ed.) (1980). *Ethics in an Age of Pervasive Technology*. Boulder, CO: Wetsview Press.

Martin, D. (1991). *Geographic information systems and their socio-economic applications*. Londres: Routledge.

Mas i Hernández, J. (2005). *Software Libre: técnicamente viable, económicamente sostenible y socialmente justo* (1.ª ed.). Barcelona: Ed. Cargraphics.

Mas i Hernández J. (2006). *Programari Lliure i empresa a Catalunya: Experiències empresarials i casos d'èxit*. Barcelona: Ed. Idear, SCCL.

Orduña, F. (2005). "SIGFRUT: aplicación web para el diseño de plantaciones e instalaciones agrícolas". *Revista Ig+ Más que Información Geográfica* (nº 4, págs. 16-18). ISSN 1885-0715. Gerona.

Seguí Pons, J. M.; Ruiz Pérez, M.; Guaita Mas, F.; Escalas, F.; Bauxà, A. (2003). "La planificación de rutas de transporte escolar a través de un SIG: El proyecto SIGTEBAL". *GeoFocus* (Artículos) (nº 3, págs. 58-76). ISSN: 1578-5157.

Smith, T. R.; Menon, S.; Star, J. L.; Estes, J. E. (1987). "Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems". *International Journal of Geographic Information Systems* (vol. 1, n.º 1, págs. 13-31).

Stevens, S. S. (1946). "On the theory of Scales Measurement". *Science* (vol. 103, n.º 2684, págs. 677-680).

Sui, D.; Goodchild, M. (2003). "A tetradic analysis of GIS and society using McLuhan's law of the media" [en línea]. *The Canadian Geographer* (vol. 47, n.º 1, págs. 5-17).

Tomilson, R. (2003). *Thinking about GIS. Geographic Information System Planning for managers*. ESRI Press.

Vicens, L.; Orduña, F. (2004). "Utilización de un SIG y herramientas de análisis visual para la determinación del posible impacto ambiental debido a la implantación de un parque eólico en la 'Serra de l'Auleda' (La Jonquera, Girona)". Aportaciones al XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección, celebrado en Murcia, 20-23 de septiembre de 2004 (vol. 1, págs. 207-220). ISBN 84-8371-485-X.