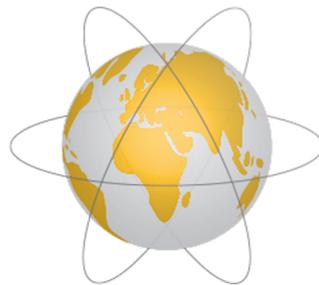


Introducción a SIG (DEMO)

Libro de lecciones

Jorge Rubiano



UNIGIS
América Latina

Índice de contenidos

Bienvenida	6
Copyright	7
Impronta, Derechos de autor y Descargo de Responsabilidad	7
Impressum, Copyright and Disclaimer	7
Introducción	9
Lección 1. El Enfoque Espacial de los SIG	10
Presentación de la lección 1	11
Objetivos de la lección	11
Resumen de la lección	11
1. ¿Qué tiene de especial lo espacial?	13
1.1. El conocimiento humano del mundo	13
1.2. Cognición espacial	14
1.2.1. La percepción humana de las propiedades espaciales del mundo . . .	15
1.2.2. Problemas cognitivos en Geoinformática	16
1.2.3. Cuestionario: Razonamiento espacial	17
1.3. Problemas geográficos	18
1.4. Utilización y aprendizaje de mapas	19
1.5. El lenguaje espacial	19
1.6. Investigando preguntas geográficas	21
1.7. La importancia del conocimiento en los SIG	22
1.8. Lo espacial es un valor añadido	22
2. Breve historia de los conceptos	24
2.1. Johann-Heinrich von Thünen: disminución de la distancia	24
2.2. Dr. John Snow: razonamiento espacial	26
2.3. Walter Christaller: Teoría del lugar central	26
2.4. Ian McHarg: superposición de mapas	28
2.5. Torsten Hägerstrand: espacio y tiempo	29
2.6. Waldo Tobler: la primera ley	31
2.7. Stan Openshaw: detección de grupos	31
2.8. Michael Goodchild	33
2.9. Cuestionario	33
3. ¿Cómo entonces definir los SIG?	35
3.1. ¿Qué es la información geográfica?	35



3.2. Datos geográficos	36
3.2.1. Geometría	36
3.2.2. Datos de atributos	37
3.3. Tecnologías de la Información Geográfica	38
3.3.1. Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite (GNSS)	38
3.3.2. Teledetección y sensores remotos	39
3.4. Definiciones de SIG	39
3.5. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta	41
3.6. ¿Cómo reconocer qué es un SIG?	42
3.7. Sistemas, ciencia y estudio	42
3.8. La ciencia de la información geográfica	43
Lección II. Origen y Aplicaciones de los SIG	45
Presentación de la Lección 2	46
Objetivos de la lección	46
Resumen de la lección	46
4. El origen de los SIG	48
4.1. Aplicaciones de los SIG	50
4.1.1. E-Government	51
4.1.2. Catastro y planificación	51
4.1.3. Compañías de servicios	52
4.1.4. Transporte y Movilidad	53
4.1.5. Manejo de Recursos Naturales/SIG y Medio Ambiente	54
4.1.6. Silvicultura	55
4.1.7. Manejo de Ecosistemas	55
4.1.8. Análisis de Hábitat de Especies Silvestres	57
4.1.9. Agricultura	57
4.1.10. Gestión y Mitigación de Riesgos Naturales	57
4.1.11. Salud Pública	58
4.1.12. Geomarketing	60
4.1.13. SIG para Comunas	60
4.2. Resolviendo problemas	61
4.3. El proceso de toma de decisiones	61
4.4. Los sistemas de soporte a la toma de decisiones espaciales	62
Lección III. Datum Geodésicos y Sistemas de Coordenadas	64
Presentación de la Lección 3	65
Objetivos de la lección	65
Resumen de la lección	65
5. Datum Geodésicos y Sistemas de Coordenadas	66
5.1. ¿Por qué representar el mundo?	66
5.2. La forma de la Tierra	67
5.2.1. Modelo de Tierra elipsoide	68



5.2.2.	Multitud de elipsoides	69
5.2.3.	Modelo de la Tierra Geoide	71
5.3.	Datum geodésico	71
5.3.1.	Datum locales	75
5.3.2.	GRS80 y el Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas (SIRGAS)	76
5.3.3.	Datum geocéntrico	77
5.4.	Sistemas de referencia de altura	78
5.5.	Sistemas de Coordenadas	81
5.5.1.	Clasificación de los sistemas de coordenadas	82
5.5.2.	Coordenadas polares	83
5.5.3.	Sistemas de coordenadas cartesianas	84
5.5.4.	Sistemas de coordenadas geográficas	85
5.5.5.	Latitud	85
5.5.6.	Longitud	87
5.5.7.	Otros círculos y líneas	87
5.5.8.	Unidades angulares	90
5.5.9.	Cuestionario	90
5.6.	Transformación de Datum	90
5.6.1.	Transformación de 3 parámetros	94
5.6.2.	Transformación de 7 parámetros de Helmert	95
5.6.3.	Transformación de Molodensky	96
5.6.4.	Transformaciones basadas en cuadrícula	97
5.6.5.	Transformación “al vuelo”	97
 Lección IV. Proyecciones y Sistemas de Referencia		99
Presentación de la Lección 4		100
	Objetivos de la lección	100
	Resumen de la lección	100
6. Proyección cartográfica		101
 Lección V. Recursos SIG		102
Presentación de la Lección 5		103
	Objetivos de la lección	103
	Resumen de la lección	103
7. Recursos SIG		104
 Lección VI. Componentes y Funciones de un SIG		105
Presentación de la Lección 6		106
	Objetivos de la lección	106
	Resumen de la lección	106

8. Componentes y Funciones de un SIG	107
Lección VII. Tendencias Actuales en Geoinformática	108
Presentación de la Lección 7	109
Resumen de la lección	109
9. Tendencias Actuales	110
Lección VIII. SIG y Sociedad	111
Presentación de la Lección 8	112
Objetivos de la lección	112
Resumen de la lección	112
10. SIG y Sociedad	113
Referencias	114

Bienvenida

Bienvenid[ao] al libro de Lecciones del módulo de **Introducción a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)**. Este documento te servirá de guía para el inicio de su programa de maestría. En las siguientes páginas podrás encontrar detalle a detalle todos los contenidos de las lecciones preparadas para guiar tu aprendizaje en este módulo.

Desde el programa de maestría esperamos que la lectura de cada lección amplíe tus expectativas sobre los Sistemas de Información Geográfica, por lo que te deseamos mucho éxito para conseguir los objetivos planteados en cada una.

💡 Para llevar a todos lados...

Este libro ha sido preparado en varios formatos, de modo que puedas tener los mismos contenidos tanto en la web, como versión imprimible (PDF) y/o portable para un lector electrónico (EPUB). Podrás descargar ambos formatos portables desde la versión web.

Te invito a leer con detenimiento cada una de las lecciones preparadas para ti.

Quito, 08 de febrero de 2023

EQUIPO UNIGIS

Copyright

Español:

Impronta, Derechos de autor y Descargo de Responsabilidad

Este módulo se publica para los fines del Programa de Aprendizaje a Distancia UNIGIS del [Departamento de Geoinformática - ZGIS](#) de la Universidad de Salzburgo.

El contenido de este módulo – si no se indica lo contrario – es copyright ©UNIGIS 2022. A los participantes de UNIGIS sólo se les concede el derecho de utilizar personalmente estos materiales para fines de estudio en el marco del programa actual de UNIGIS. Nos reservamos el derecho de transmitir, almacenar, duplicar y asumir partes del material. Cualquier otro uso de los materiales más allá de los estudios de UNIGIS requiere la autorización por escrito del titular de los derechos de autor.

Los autores de este módulo declaran explícitamente que todas las marcas y nombres de productos son marcas comerciales o marcas registradas de sus respectivos propietarios y se utilizan únicamente con fines ilustrativos y explicativos. La ausencia de referencias a marcas registradas, etc., en el texto no implica la libre utilización de los nombres de productos y marcas.

UNIGIS y el logotipo de UNIGIS son marcas registradas del Departamento de Geoinformática - Z_GIS, Universidad de Salzburgo (Austria) y de la Asociación Internacional UNIGIS.

Por favor, tenga en cuenta que aunque se han tomado todas las precauciones posibles en la preparación de este módulo, los autores no asumen ninguna responsabilidad por errores u omisiones. Tampoco se asume ninguna responsabilidad por los daños resultantes del uso de la información aquí contenida.

English

Impressum, Copyright and Disclaimer

This module is published for the purposes of the UNIGIS Distance Learning Program of the [Department of Geoinformatics - ZGIS](#) at the University of Salzburg.

Contents of this module - if not stated differently - are copyright © UNIGIS 2022. UNIGIS participants are only granted the right to personally use these materials for studying purposes within the framework of the current UNIGIS program. We reserve the right to pass on, store, duplicate and take over parts of the material. Any other use of materials beyond UNIGIS studies requires the written permission of the copyright holder.

The authors of this module explicitly state that all brands and product names are trademarks or registered trademarks of their respective owners and are used for illustrative and explanatory purposes only. Missing reference to registered trademarks etc. in the text does not imply free usage of product and brand names!

UNIGIS and the UNIGIS logo are registered trademarks of the Department of Geoinformatics – Z_GIS, University of Salzburg (Austria) and the UNIGIS International Association.

Please note while every precaution has been taken in the preparation of this module, the authors assume no responsibility for errors or omissions. Neither is any liability assumed for damages resulting from the use of the information contained herein.

Introducción

Las nuevas tecnologías están acelerando la ciencia y el conocimiento. La velocidad con la que se generan técnicas de recolección y análisis de datos espaciales permiten alcanzar fronteras del saber que nunca antes se habían visto.

Durante su recorrido por este módulo, obtendrá una visión general de los SIG y en particular de la relevancia que estos poseen hoy día en la mayoría de nuestras actividades como individuos y como integrantes de la sociedad. Tendrá la oportunidad de conocer la naturaleza de su enfoque, su origen y aplicaciones. Dado el permanente desarrollo de los SIG, se revisarán los recursos disponibles hoy día para su puesta en práctica, los cuales pueden abordar individual o de manera conjunta, los componentes y funcionalidades atribuibles a los SIG. Se presentará lo más actualizado de las tendencias tecnológicas y el cómo la sociedad les da uso para enfrentar las múltiples necesidades que demandan permanentemente acciones y decisiones propias de nuestro tiempo. Como parte central del módulo, se profundiza en los sistemas de proyecciones y coordenadas, los cuales constituyen la interfaz básica y necesaria entre la realidad y su representación en arreglos de datos en forma y contenido los cuales permiten su procesamiento y análisis. Consolidar su conocimiento en el tema central de este módulo le garantizará un trasegar más amigable durante el resto del programa.

Las lecciones tienen componentes teóricos bastante extensivos y en cada una de ellas se listan lecturas complementarias para esas mentes hambrientas de conocimiento.

Lección I.

El Enfoque Espacial de los SIG

Presentación de la lección 1

Objetivos de la lección

Al completar esta lección se espera que usted pueda...

- Abordar la importancia de la noción del espacio en la comprensión y transformación del entorno
- Conocer los antecedentes históricos de los SIG
- Abordar la definición de los SIG, sus componentes y funciones

Una vez complete esta lección, Ud. habrá adquirido una visión general de la perspectiva espacial como el marco que permite reconocer la diversidad de problemas y tipos de análisis que aplican a situaciones que ocurren en un espacio. Aprenderá que la presentación del componente espacial de las cosas es importante para apreciar la riqueza de información, sugerir preguntas y ofrecer solución a los problemas.

Resumen de la lección

Muchos problemas en temas de salud, logística, gestión forestal, transporte, administración o agricultura son geográficos en su naturaleza. La perspectiva espacial es una variable más para la resolución de problemas, y la localización es, a menudo, de gran importancia.

En esta lección descubriremos por qué lo espacial es especial; por qué la perspectiva espacial añade valor a las actividades humanas. Conoceremos las diferentes propiedades espaciales del mundo y la importancia del conocimiento espacial para el estudio y la práctica de los SIG. También se introducirá en la utilización de los mapas mentales y el lenguaje espacial.

Antes de iniciar con la primera lección de este módulo, se recomienda ver la serie de vídeos [Revolución Geo-Espacial](#) de Penn State en los Estados Unidos. Todos son una excelente y motivadora forma de empezar sus estudios en SIG. El primero es la historia de nuestro planeta, mientras que los otros dos muestran los avances en el campo geográfico en nuestro mundo actual. Descubrirá de qué manera los SIG nos ayudan a ver nuestro mundo a través de varias perspectivas y desde diferentes niveles. ¡Que lo disfrute!

Entender los SIG requiere considerar la ciencia, los sistemas y su estudio. Los SIG como tecnología integrada proveen la estructura para la gestión del espacio. Los SIG son fundamentalmente una ciencia para la resolución de problemas. Entender las bases científicas que hay detrás de las aplicaciones nos va a ayudar a interpretar los resultados y a entender su trascendencia.

En esta lección notaremos lo complejo de la definición de los SIG. La información geográfica es información sobre posiciones en la superficie de la Tierra. Las Tecnologías de la Información Geográfica incluyen Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. La Ciencia de la IG es la ciencia que aporta el cuerpo de ideas de las tecnologías de IG. Es imprescindible, además, conocer los fundamentos científicos de los SIG para utilizarlos de forma consciente y eficiente.

1. ¿Qué tiene de especial lo espacial?

Independiente de la razón que le ha llevado a empezar los estudios en Sistemas de Información Geográfica, el caso es que, por alguna razón, seguro ha estado en contacto con los SIG, y en este momento tiene interés en ampliar su conocimiento en este campo.

Desde el primer momento en que empezamos a hablar de SIG y pensamos en ello, vemos que lo espacial parece ser especial. Por esta razón, nuestro punto de partida intentará responder la pregunta: ‘¿Qué tiene de especial lo espacial?’

1.1. El conocimiento humano del mundo

Antes de empezar a explorar el campo de los SIG deberíamos reflexionar sobre cómo percibimos el mundo que nos rodea. El conocimiento espacial se ocupa de cómo pensamos sobre el medio y del conocimiento que tenemos de las propiedades espaciales del mundo (Figura 1.1).

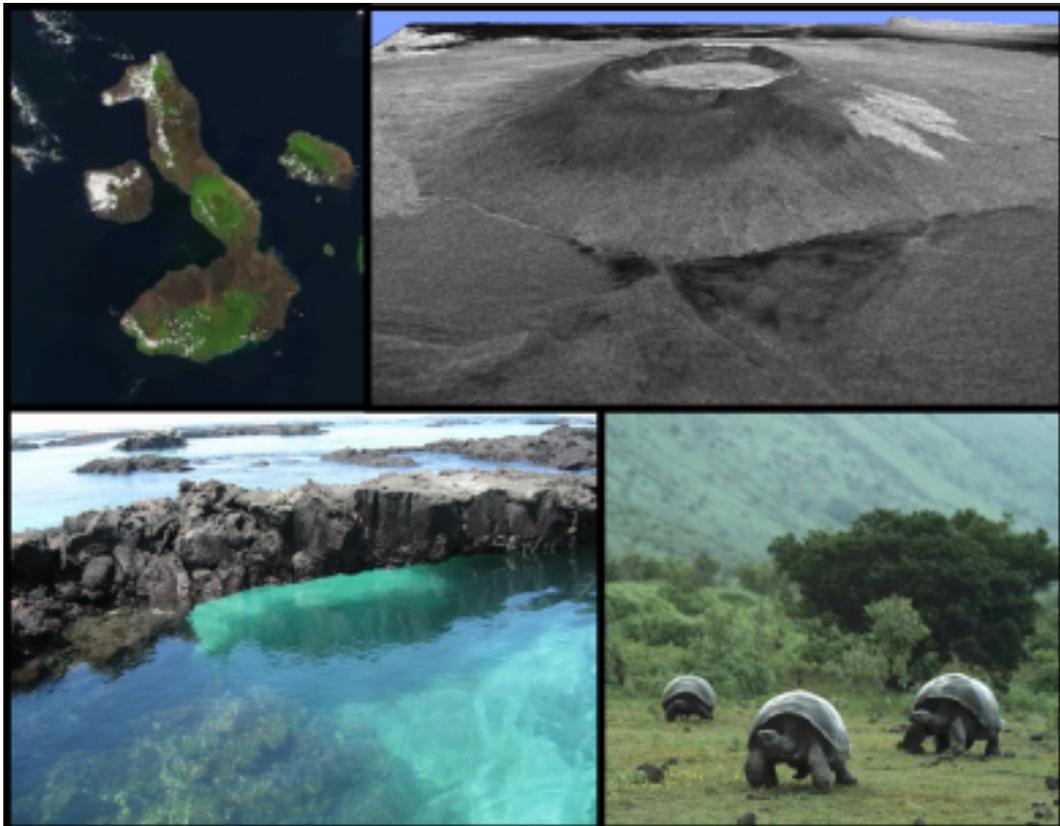


Figura 1.1.: Diferentes perspectivas del mismo espacio geográfico: Galápagos

El mundo es espacial y, por ello, cualquier cosa puede tener una dimensión espacial. De hecho, el 80% de los datos de nuestra vida diaria son datos espaciales (por ejemplo, un listín telefónico, los mapas de un periódico, la ruta del bus, los anuncios en las calles). Además, muchos de nuestros problemas cotidianos son problemas espaciales: la manera de llegar al trabajo, la localización de los atascos, escoger el destino de un viaje, los residuos peligrosos, incluso las guerras responden a problemas espaciales.

Los elementos del mundo son espaciales en esencia, y la humanidad es observadora de esta realidad, pero ¿el mundo es tal como es o tal como lo vemos? ¿O, tal vez, es como lo percibimos?

Observemos las imágenes de la figura 1, Todas ellas corresponden al mismo lugar, la Isla Isabela, la más grande del archipiélago de las Galápagos. Las cuatro imágenes nos “cuentan” aspectos muy diversos. Nuestros intereses, medios, puntos de vista, etc., condicionarán la percepción que tengamos del espacio.

1.2. Cognición espacial

La necesidad de comunicar información espacial fue quizás uno de los desencadenantes más tempranos e importantes en el desarrollo del lenguaje. Los miembros de una tribu necesitaban comunicar de alguna manera las ubicaciones de buenos cotos de caza o abundantes parches de arbustos de bayas (véanse los primeros mapas en la Figura 1.2).



Figura 1.2.: Percepción del mundo y comunicación sobre él

Comprender cómo nosotros (los humanos) usamos nuestro lenguaje para describir el espacio para encontrar nuestro camino, o por ejemplo la casa de un amigo, es un campo de investigación interdisciplinario y muy activo. No menos importante, esto se ha visto impulsado por el diseño de nuevas interfaces de control por voz. Más profundamente, el lenguaje influye significativamente en la forma en que pensamos sobre el espacio y los fenómenos espaciales (Freksa, Mark, y Frank 1991). La forma en que los humanos comprenden y representan los fenómenos espaciales se conoce como cognición espacial. El estudio de la cognición espacial investiga los procesos empleados para adquirir, almacenar y recordar el conocimiento espacial (Medyckyj-Scott y Blades 1992).

Una descripción completa de la representación del conocimiento espacial fue propuesta por Piaget y Inhelder (1956), incluyendo sus 3 componentes:

Conocimiento declarativo (punto de referencia o señal) de objetos y/o lugares junto con sus significados; es un requisito mínimo para el reconocimiento de objetos y patrones.

El conocimiento relacional (configuracional) es donde se desarrolla la información sobre las relaciones espaciales entre objetos o lugares (por ejemplo, proximidad y secuencia), lo que da como resultado la generación de fragmentos de conocimiento espacial y un sentido de multidimensionalidad.

El conocimiento procedimental es donde los objetos y los procedimientos se asocian con procesos como el desarrollo de la capacidad locomotora, que es necesaria para el desarrollo del comportamiento de orientación y el aprendizaje de rutas.

Definición: La cognición, en general, se trata del conocimiento (Montello 1997). La ciencia cognitiva es el estudio científico interdisciplinario de la mente y sus procesos.

Siegel y White (1975) ampliaron esta descripción agregando las etapas en la representación del conocimiento espacial de un individuo, que es probable que surjan con el aumento de la edad o la experiencia. Estudiaron el conocimiento espacial de un entorno de personas adultas e identificaron los siguientes tres niveles (en comparación con los componentes del conocimiento espacial discutidos anteriormente):

- Los puntos de referencia son puntos distintivos, típicamente familiares en el entorno.
- El conocimiento de la ruta se caracteriza por el conocimiento de las rutas entre puntos de referencia (información topológica), pero carece de una comprensión general del espacio (p. ej., incapacidad para recordar la descripción de la ruta completa de la memoria).
- El conocimiento topográfico (o configuracional) significa la comprensión adecuada de la organización espacial, es decir, la capacidad de localizar objetos en términos de ruta entre ellos utilizando, p. información sobre distancia y dirección (por ejemplo, descubrimiento de atajos).

Considere el siguiente ejemplo: debido a un nuevo trabajo, una persona se mudó a una nueva ciudad. De acuerdo con la teoría de Siegel y White, primero la persona aprende las posiciones relativas de puntos de referencia como su nuevo hogar, la ubicación de la oficina, una cafetería y un centro comercial local; luego los conecta con rutas; y luego comienza a descubrir rutas alternativas, una panadería y una farmacia a lo largo de una de las rutas... ¿Cómo se compara tu experiencia en el aprendizaje de un nuevo entorno con esta historia y, a su vez, con esta teoría?

1.2.1. La percepción humana de las propiedades espaciales del mundo

A escala humana, el mundo consiste en objetos, eventos y procesos que tienen el medio ambiente de fondo. Entender los fundamentos del mundo espacial es crucial para construir el conocimiento necesario para el estudio de los SIG. El conocimiento espacial se ocupa de las propiedades espaciales del mundo. El conocimiento humano de este mundo espacial incluye sensaciones y percepciones, pensamientos, imágenes, razonamientos y resolución de problemas, memoria, aprendizaje y lenguaje.

Las **propiedades espaciales** de los elementos del mundo son:

- Posición
- Tamaño

- Distancia
- Dirección
- Forma
- Textura
- Movimiento
- Relación entre objetos

Los objetos espaciales tienen una **posición**, por lo que pueden ser vinculados en algún lugar de la superficie de la Tierra utilizando, por ejemplo, coordenadas o direcciones postales. Además, según 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.

La **distancia** y la **dirección** son también muy importantes como propiedades espaciales del mundo. ¿Qué distancia hay, por ejemplo, de Quito a Caracas? Esto dependerá de la forma como se mida la distancia. Con una cinta métrica y un mapa podremos calcular la distancia exacta entre dos ciudades. ¿Pero eso realmente nos importa si lo que queremos es viajar en carro? ¿No sería más importante conocer cuánto tiempo tardaremos en llegar, por ejemplo, en avión, en tren o en coche? En este caso podríamos medir la distancia en horas. Pero también puede ser interesante saber cuánto nos va a costar el viaje, ya que tal vez nos saldría más rentable abordar un avión y hacer escala primero en Bogotá. Aunque eso signifique ir a otra dirección y aumentar la distancia, esta podría ser la opción más barata para llegar a Caracas.

Para describir objetos se puede utilizar su **forma**, si es compacto, alargado, irregular, etc. Si analizamos la posición y la distancia de los objetos espaciales podemos distinguir diferentes **texturas**. Esto puede ser muy interesante para explorar la distribución espacial, por ejemplo, de enfermedades, comportamientos en el voto o accidentes, con el objetivo de encontrar soluciones.

“Conocer dónde se encuentran las cosas puede ser realmente importante en logística y transportes, donde el objetivo es el **movimiento** de bienes y personas de un lugar a otro y las infraestructuras que lo permiten” (Longley et al. 2015)

Finalmente, la existencia o no de las **relaciones** entre los objetos puede ser crucial cuando abordamos problemas espaciales. Por ejemplo, en la detección de actividades criminales para la localización de estaciones de policía, puntos de agua en el caso de animales o comercios en el caso de consumidores potenciales.

1.2.2. Problemas cognitivos en Geoinformática

Como se muestra en los mapas mentales individuales de la Figura 1.3, la percepción y la memoria del espacio pueden diferir considerablemente entre las personas. Esta es la razón por la que el conocimiento de la información geográfica todavía se considera uno de los grandes desafíos en la investigación de la ciencia SIG (McMaster y Userly 2004). Para hacer que las aplicaciones y herramientas espaciales sean más utilizables, nosotros, como expertos en IG, necesitamos una comprensión más profunda de cómo las personas representan y piensan sobre el espacio.

Estos son algunos ejemplos típicos de problemas cognitivos en Geoinformática:

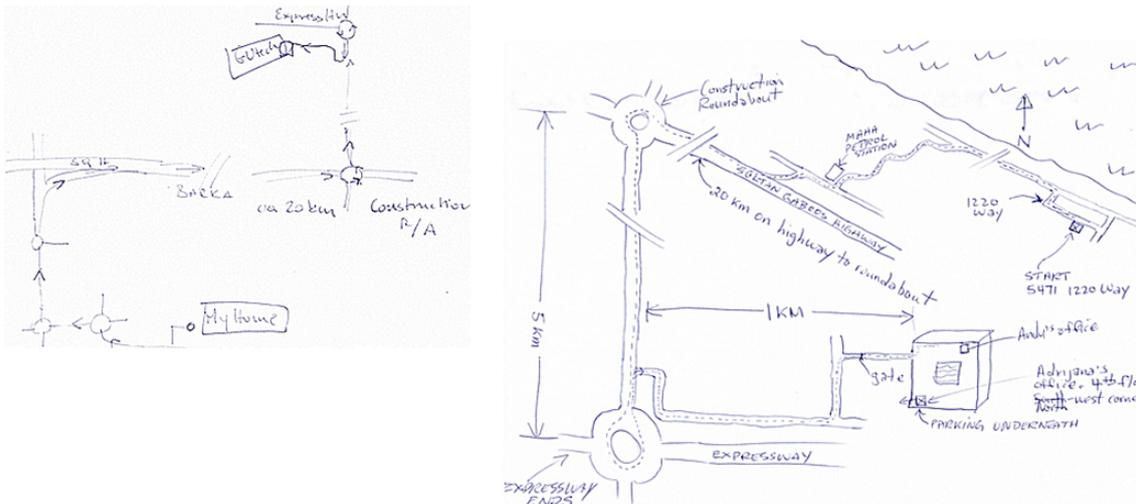


Figura 1.3.: Mapas mentales de cómo llegar de “casa” a “oficina” por 2 personas diferentes

- cómo los expertos y los legos conceptualizan y razonan sobre el espacio geográfico, y cómo se pueden diseñar y enseñar herramientas de apoyo para apoyar a ambas categorías de usuarios,
- cómo las personas expresan información espacial en lenguaje natural (como el inglés) y cómo se puede utilizar para optimizar la comunicación de voz en los sistemas de navegación de automóviles,
- cómo deben diseñarse las interfaces para promover la comunicación precisa y eficiente de la información espacial y geográfica, como la escala, la incertidumbre y la estructura de la red.

1.2.3. Cuestionario: Razonamiento espacial

¿Qué es el proceso lógico en el razonamiento espacial? Intente resolver el cuestionario rápido que se muestra en la Figura 1.4. ¡Arrastre y suelte los pasos en el flujo de trabajo en el orden correcto! Comience desde la parte superior izquierda y coloque las tarjetas en cascada hacia la parte inferior derecha. Cuando todo esté colocado correctamente, haga clic en el símbolo de verificación en la parte inferior derecha.

¿Obtuvo el orden correcto en la primera ejecución? ¿Colocó la tarjeta “Identificar una pregunta” en el primer lugar intuitivamente?

Si bien esto puede parecer trivial y se corresponde con la comprensión intuitiva de un proceso de razonamiento, muy a menudo el flujo de trabajo se invierte cuando los estudiantes de maestría (y también los investigadores más avanzados) presentan sus ideas sobre un posible tema de investigación. En lugar de decir “Quiero saber por qué (o dónde o cómo)”, a menudo dicen “Quiero hacer algo con los datos de Twitter”. o “Quiero hacer algo con Machine Learning”, que coloca el segundo o tercer paso en el flujo de trabajo por adelantado: un método buscando una pregunta.

Como profesionales de IG, debemos tener en cuenta que estamos trabajando con herramientas para cumplir un propósito particular. Incluso si nos fascinan los datos e incluso si somos muy buenos expertos en el manejo de las herramientas, siguen siendo un medio

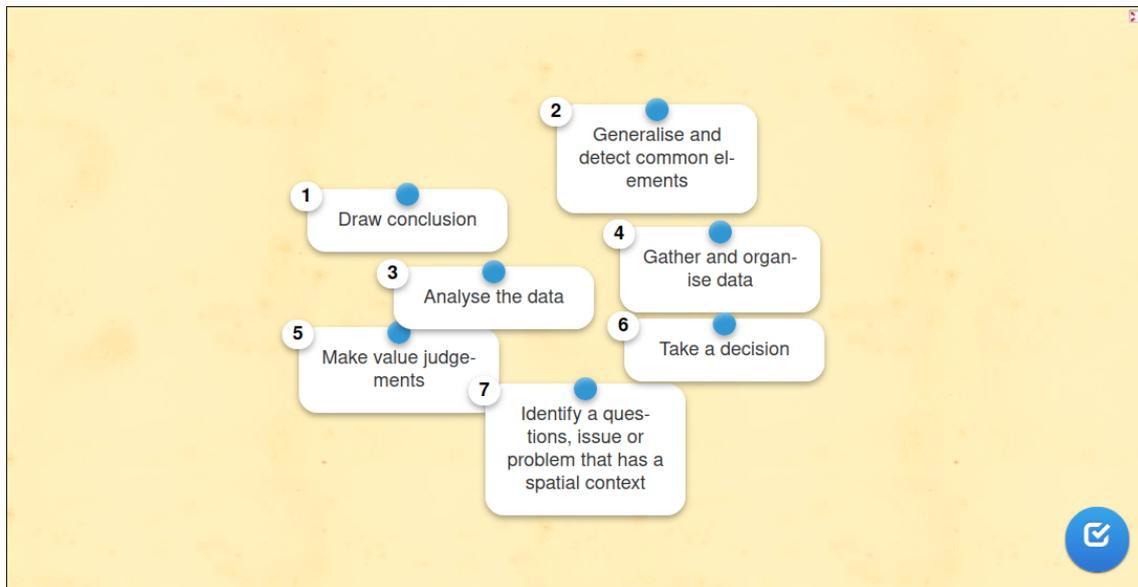


Figura 1.4.: Cuestionario - el proceso de razonamiento espacial: [Acceder](#)

para un fin. El propósito es lo que está al principio y debe impulsar nuestro proceso de razonamiento.

1.3. Problemas geográficos

Los problemas que están anclados en el espacio, como los que acabamos de discutir, se denominan problemas geográficos (Longley et al. 2015; Pucha-Cofrep et al. 2017). Estos se pueden clasificar en base a:

Escala o nivel de detalle geográfico: estos son problemas relacionados con una ocurrencia local, regional, nacional o global. Un diseño arquitectónico de una casa familiar requiere información geográfica a escala local que cubra un área bastante pequeña, pero con un alto nivel de detalle, como el tamaño de una parcela de tierra, su forma y pendiente. Fenómenos como el cambio global, por otro lado, deben estudiarse a una escala mucho más completa, cubriendo grandes áreas (globales) e integrando datos de muchas fuentes diferentes. En la literatura geográfica, la escala local a menudo se denomina gran escala, y la escala global se denomina pequeña escala. Desafortunadamente, es exactamente lo contrario en otros dominios como la ecología o la arqueología. En estas disciplinas, las escalas globales se conocen como gran escala. Para evitar confusiones, no usaremos pequeño o grande para definir la escala en este módulo.

Propósito o intención: determina la naturaleza del problema como práctico o más bien teórico. Por lo general, los primeros deben resolverse rápidamente y con un costo mínimo con efecto inmediato, por ejemplo, organizar la retirada de nieve en un barrio o la recogida/dejada de escolares. La resolución de problemas teóricos a menudo está impulsada por la curiosidad humana y generalmente contribuye al avance de la comprensión humana del mundo, por ejemplo, el efecto del calentamiento global en las corrientes oceánicas o impacto del niño/la niña en los patrones de lluvia en las Américas.

Escala de tiempo: los problemas pueden requerir soluciones operativas, tácticas o estratégicas. En una empresa de reciclaje, las decisiones operativas a corto plazo permiten el funcionamiento diario sin problemas de los camiones que recogen los productos de reciclaje en las áreas designadas y los entregan en la estación de reciclaje más cercana o adecuada. Las decisiones tácticas a medio plazo se centrarán en rediseñar rutas de camiones para incluir un complejo de viviendas de nueva construcción en el servicio. Las decisiones estratégicas, como expandir o racionalizar la red de la empresa, le dan a la empresa una dirección a largo plazo.

Todos estos problemas tienen (al menos) una cosa en común: datos espacialmente referenciados.

1.4. Utilización y aprendizaje de mapas

El **objetivo de los mapas** cartográficos es comunicar información geográfica y servir de soporte para la resolución de problemas.

Pero ¿cómo se consigue una comunicación eficiente a través de los mapas?

Los humanos tenemos facilidad para extraer con rapidez gran cantidad de información a partir de imágenes, fotografías o gráficos. Incluso la información no espacial o no perceptiva puede ser representada y visualizada de esta forma. Los mapas usan, o deberían usar, escalas convenientes y perspectivas de visualización, de manera que pueda percibirse todo desde un solo punto de visualización. Los mapas, además, enfatizan las propiedades relevantes y omiten o disimulan aquellas que no lo son, de forma que percibamos únicamente aquello meramente importante.

En la Figura 1.5 podemos observar un mapa esquemático de la red de metro de Londres realizado en 1933, en el que no se representa las líneas y estaciones geográficamente. Los mapas conceptuales nos ayudan a entender la realidad, de manera que únicamente visualizamos la información necesaria, eliminamos elementos distorsionantes, aumentando así su eficacia y utilidad.

Así, ¿mediante los mapas se puede confundir o distorsionar la comunicación? Las proyecciones, generalizaciones, exageraciones y omisiones realizadas en el proceso de generación de la información del mapa pueden despistar, distorsionar o engañar. Las transformaciones de escala entre mapas y el mundo real no son sencillas. Las traducciones de la perspectiva desde la vista aérea a una vista a nivel del suelo pueden ser confusas. La interpretación de los símbolos (colores, puntos, símbolos, líneas de contorno), puede ser complicada y, en algunos casos, puede llegar a despistar.

El entrenamiento y el aprendizaje en la interpretación de la información cartográfica también pueden cambiar la forma como son percibidos e interpretados los mapas.

1.5. El lenguaje espacial

La información espacial suele ser transmitida de forma verbal. Lo hacemos cuando indicamos a alguien la ruta para llegar a un punto de destino, a partir de términos espaciales

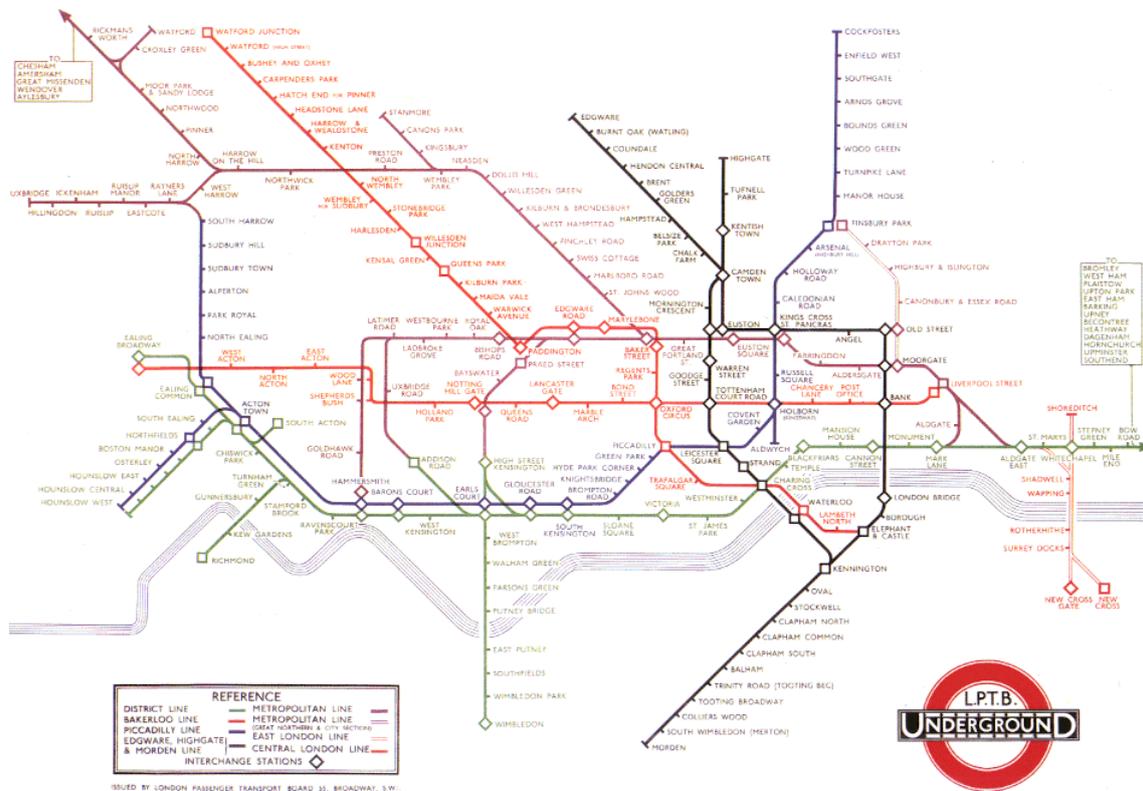


Figura 1.5.: Mapa esquemático de la red del metro de Londres

cuantitativos (cien metros o una hora), y/o términos espaciales de localización (aquí, allá, derecha, izquierda).

Cuando nos expresamos en lenguaje espacial normalmente estamos traduciendo un conocimiento espacial no-verbal que puede alterar la información. El lenguaje espacial suele utilizar preposiciones, que acostumbran a ser difíciles de traducir a otro idioma, y expresa información cuantitativa poco precisa, ya que las localizaciones generales o las conexiones son más importantes.

En la Figura 1.6 vemos un mapa mental y esquemático de la localización de una fiesta. Es un buen ejemplo de cómo utilizamos un mapa como modelo de la realidad, en este caso para identificar el camino a una fiesta. Como se observa, el mapa es una abstracción de la realidad: la realidad ha sido simplificada para transmitir sólo la información útil para encontrar el lugar en donde se encuentra la fiesta. De esta manera, los anfitriones han construido un modelo espacial simple y efectivo.

La efectividad de los mapas depende de los conocimientos que se asume que tiene el usuario. En el caso de la Figura 1.6 se supone que sabemos leer castellano, que entendemos algunos símbolos, etc. Por otro lado, el autor del mapa también asume que éste sólo sirve para ayudar a sus invitados a encontrar la fiesta. Los conocimientos asumidos y el uso apropiado de los modelos espaciales son dos temas centrales en la aplicación práctica de las tecnologías SIG.

Si nos hemos “perdido” en una ciudad y preguntamos a alguien cómo llegar a cierto punto, a no ser que tengamos un mapa a mano, nos tendrán que indicar la dirección



Figura 1.6.: Mapa esquemático de la localización de una fiesta.

correcta mediante el lenguaje oral. En el caso de las indicaciones verbales, la persona que da orientaciones a otra de cómo llegar a un lugar asume ciertas habilidades de comprensión en la persona que le ha preguntado.

Dependiendo de cómo nos ha indicado la persona a la que hemos preguntado, y de nuestra habilidad de observación y orientación, llegaremos al punto de destino o no. Pero ¿cuáles son buenas indicaciones y cuáles no? ¿Las marcas del terreno y las acciones “gira a la derecha” o una descripción exhaustiva del espacio? ¿Cómo nos ayudan los gestos y los mapas en las indicaciones? ¿Cómo se combinan con las palabras? ¿Qué nivel de concreción es el mejor? ¿Debemos indicar también cómo corregir la dirección en el caso de pasarse el cruce?

Observamos que hay muchas ambigüedades en las direcciones verbales. ¿Qué es una “manzana”? ¿Qué es una “intersección”? ¿Qué significa “girar a la derecha” cuando cinco calles se juntan o cuando entramos a un redondel o glorieta?

1.6. Investigando preguntas geográficas

Los procesos de investigación pueden también aplicarse mediante la formulación de preguntas geográficas: ¿Qué hay dónde?, ¿Dónde se encuentra algo?, ¿Por qué esto está aquí?, ¿Por qué no está en otra parte?, ¿Dónde están sus límites?, ¿Dónde está algo con relación a otros del mismo tipo?, ¿Qué tipo de distribución siguen?, ...

Las preguntas sobre “*el dónde*” de los objetos espaciales se hacen para fomentar el pensamiento y la abstracción en el aprendizaje. Y las respuestas a estas preguntas a veces implican la creatividad en la integración, modificación o manipulación de diferentes cantidades de información.

Según Nyerges y Jankowski (1997), los **problemas geográficos** se pueden categorizar según en qué se basan:

- Localización y extensión.
- Distribución y textura o forma.
- Asociación espacial.
- Interacción espacial.
- Cambio espacial.

Con la finalidad de responder a estas cuestiones, la investigación geográfica requiere de la práctica individual, de las aptitudes de observación, definición, clasificación, análisis, deducción, razonamiento, integración, y asociación al problema.

1.7. La importancia del conocimiento en los SIG

A menudo los SIG son complicados de usar de forma efectiva y eficiente, de hecho, pocas veces se utiliza todo su potencial. Se trabaja con aplicaciones que cuestan más tiempo y dinero, son más complicadas de usar de lo que deberían, y no llevan a cabo la totalidad de los procesos.

El conocimiento está relacionado con tres de las principales funciones de los SIG: almacenaje, representación y análisis de los datos referenciados. Las limitaciones y problemas de los SIG podrían ser mejorados poniendo especial énfasis en el conocimiento humano. Es decir, la forma como el ser humano adquiere, razona y comunica el conocimiento mediante los SIG.

El **estudio del conocimiento** es sobre el saber, su adquisición, almacenamiento, recuperación, manipulación y utilización por los humanos y otras criaturas inteligentes. El conocimiento incluye la percepción, el pensamiento, el razonamiento, la resolución de problemas, la memoria, el aprendizaje y el lenguaje. Las estructuras y los procesos del conocimiento son parte de las mentes, van del cerebro al sistema nervioso en el interior de los cuerpos de este mundo físico y social.

Algunos ejemplos de objetivos de conocimiento en SIG son:

- ¿Cómo las personas, expertas o no, conceptualizamos y razonamos sobre el espacio geográfico?
- ¿Cómo tienen que ser diseñados y pensados los sistemas para apoyar los diferentes usuarios o usuarias?
- ¿Cómo la gente expresa la información espacial en el lenguaje natural?
- ¿Cómo puede usarse este lenguaje natural para mejorar la comunicación con el SIG (por ejemplo: las indicaciones del navegador del coche)?
- ¿Cómo tendrían que ser diseñadas las interfaces para promover la comunicación precisa y eficiente de la información geográfica, como la escala, la incertidumbre y las estructuras de redes?

1.8. Lo espacial es un valor añadido

¿A qué nos referimos cuando afirmamos que la perspectiva espacial es un valor añadido para diferentes disciplinas?

La **perspectiva espacial** añade interés, fiabilidad y efectividad debido a que facilita los procesos al suministrar información real sobre la localización de los recursos, y porque permite filtros, alteraciones y creación de nueva información.

¿Por qué es tan importante la información geográfica (IG)? Porque todo lo que ocurre en el mundo tiene lugar en algún sitio. Y, además, el conocimiento de dónde ocurre es sumamente importante, por ejemplo: los límites de un país, la localización de los hospitales, las rutas de reparto, la gestión forestal, encontrar fondos para la defensa de los océanos, ...

La localización en el espacio es un objetivo que puede resolver muchos problemas de la sociedad actual. Algunos son tan rutinarios que ni los apreciamos: la cuestión diaria de qué ruta escoger, recibir direcciones mientras conducimos, escoger un hotel, etc. Otros son tan relevantes que afectan a millones de personas, como el desmantelamiento de la antigua Unión Soviética.

Los problemas que incluyen aspectos espaciales, aunque sea en la información que permite su solución o en los resultados obtenidos, son considerados espaciales o geográficos.

Podemos decir que **lo espacial es especial** porque:

- Todos los elementos del mundo pueden definirse por su posición.
- El componente espacial es esencial en variedad de disciplinas.
- El trabajo con información espacial conlleva decisiones únicas, complejas y difíciles.

Como consecuencia de esto, la información geográfica ha propiciado el crecimiento de una importante industria especializada y las universidades ofrecen cursos diseñados específicamente en ciencias y sistemas de la información geográfica.

2. Breve historia de los conceptos

La forma, cómo pensamos sobre el espacio y cómo razonamos con el espacio para tomar una decisión, no solo varía entre individuos. De hecho, los conceptos en los que basamos la cognición espacial y el razonamiento han evolucionado a lo largo de la historia, y siguen evolucionando en la actualidad. Solo piense en los tiempos antes de que los mapas globales en línea estuvieran disponibles. Uno de los primeros y más influyentes mapas en línea inició sus servicios en 2005: Google Maps. No hace mucho tiempo, de verdad. Tómese un momento para pensar cuánto ha cambiado nuestra percepción espacial del mundo.

Comencemos un viaje a través del tiempo para resaltar cómo se desarrollaron la teoría geográfica y los conceptos del pensamiento espacial. Con el ejemplo de algunos académicos extraordinarios, resaltaré los orígenes conceptuales de la geoinformática y reconoceré la contribución de estos investigadores y profesionales al campo.

Para aquellos de ustedes que tengan más interés en las raíces históricas de nuestra disciplina, les recomiendo navegar a través de los Clásicos del CSISS, que presenta a los principales contribuyentes al pensamiento espacial, proporcionado por el Centro de Ciencias Sociales Integradas Espacialmente. En la historia más reciente, ESRI proporciona un guion gráfico sobre la historia de GIS.

2.1. Johann-Heinrich von Thünen: disminución de la distancia



Figura 2.1.: Johann-Heinrich von Thünen (1738 - 1850) (Longley et al. 2015)

Von Thünen (Figura 2.1) fue un agricultor y un famoso economista de su tiempo, en el cambio del siglo XVIII al XIX. Quería determinar el uso de la tierra más rentable

para su finca. Para este propósito, von Thünen conceptualizó la relación entre el uso del suelo en dependencia de la ubicación de un mercado central. En su modelo de uso de la tierra agrícola de 1826, los cultivos agrícolas estaban ubicados en ubicaciones radiales alrededor de una ciudad en una secuencia con una intensidad de uso de la tierra creciente (Figura 2.2).

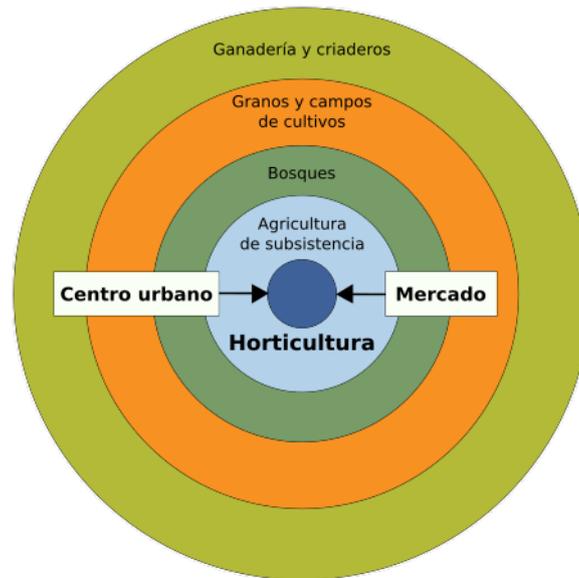


Figura 2.2.: Equilibrar la asignación del uso del suelo con el costo del transporte

Su modelo se basa en los siguientes supuestos limitantes:

- El mercado central está ubicado dentro de lo que se conoce como un “Estado aislado”, lo que sugiere una comunidad que es autosuficiente y no tiene influencias externas.
- Este “Estado aislado” está rodeado por una tierra desocupada y sin uso.
- El territorio del Estado es completamente homogéneo, sin ríos, montañas u otros obstáculos. Además, el suelo, el clima y todos los demás factores de la agricultura son los mismos.
- En el “Estado Aislado” no existen grandes vías de transporte. Es decir, los agricultores del Estado transportan sus propios productos al mercado a través de carretas de bueyes, vía terrestre, directamente al mercado central.
- Los agricultores del estado hacen lo que necesitan para obtener la mayor ganancia en el mercado.

Aunque el modelo de Von Thünen se creó en la época preindustrial, antes de que se construyeran fábricas, carreteras e incluso ferrocarriles, sigue siendo un modelo importante en geografía, porque es una excelente ilustración del efecto de disminución de la distancia. A medida que uno se aleja de una ciudad, el precio de la tierra disminuye. Los agricultores equilibran el costo del transporte, la tierra y las ganancias para producir el producto más rentable para el mercado.



Figura 2.3.: Dr. John Snow (1813-1858) (Longley et al. 2015)

2.2. Dr. John Snow: razonamiento espacial

John Snow (Figura 2.3) fue médico en Londres en el siglo XIX. En 1854, fue testigo de una epidemia de cólera. En ese momento aún no se habían detectado gérmenes microscópicos y, por lo tanto, se desconocía la verdadera fuente del cólera. Sin embargo, el Dr. Snow, al investigar la epidemia, comenzó a trazar la ubicación de las muertes relacionadas con el cólera. En ese momento, el agua de Londres era abastecida por dos compañías de agua. Una empresa extrajo el agua del río Támesis río arriba de la ciudad principal, mientras que la otra empresa desvió el agua del río río abajo de la ciudad.

A través del mapeo (Figura 2.4) de las ubicaciones de las muertes por cólera, Snow destacó un área en particular, donde ocurrieron 500 muertes en solo 10 días. Cuando el Dr. Snow se dio cuenta de que la bomba de agua de Broad Street estaba justo en el centro de esta área, investigó más a fondo. Desde la perspectiva actual, no es sorprendente que la bomba de Broad Street se abasteciera de agua desde la ubicación aguas abajo. John Snow descubrió además que los hombres que trabajaban en una cervecería no se vieron afectados: bebieron el agua del propio pozo de la cervecería.

Con base en esta evidencia, el Dr. Snow aconsejó a los funcionarios de la ciudad que quitaran la manija de la bomba de Broad Street. Esta medida mostró un efecto inmediato y la epidemia fue contenida. Es un caso temprano de razonamiento espacial científico basado en la evidencia.

2.3. Walter Christaller: Teoría del lugar central

La pregunta que planteó Walter Christaller (Figura 2.5) en su emblemático libro fue: “¿Existen reglas que determinen el tamaño, el número y la distribución de los pueblos?” (Christaller 1933). Intentó responder a esta pregunta a través de una teoría de los lugares centrales a un nivel muy esquemático, utilizando formas geométricas.

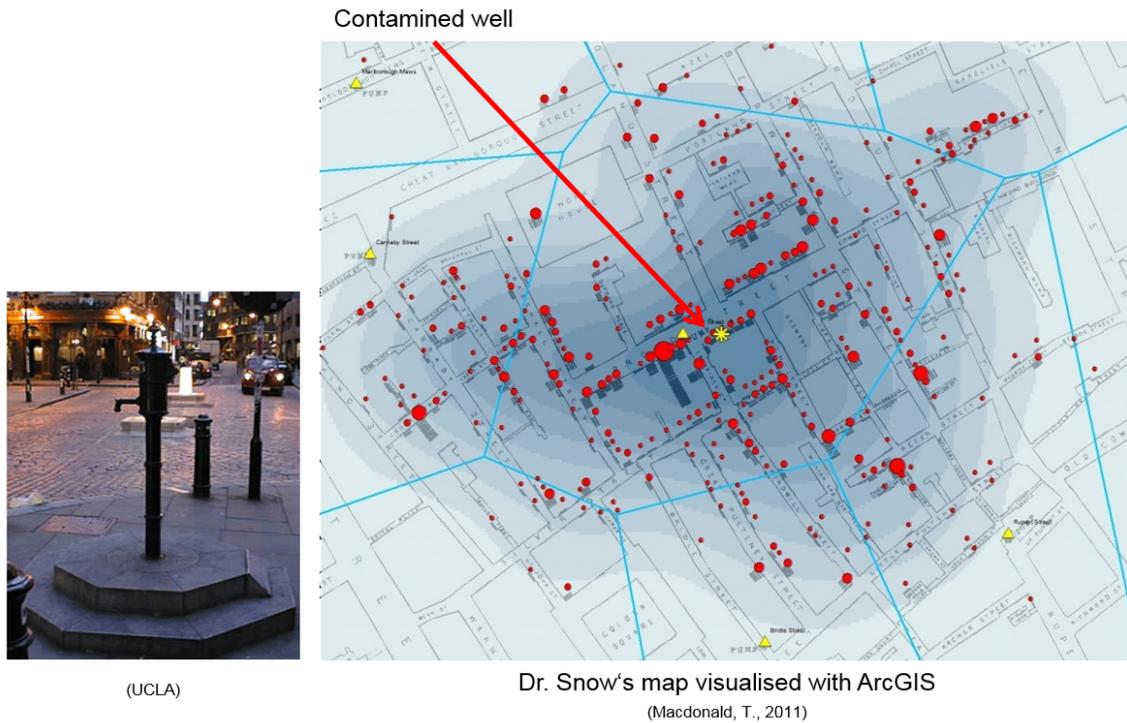
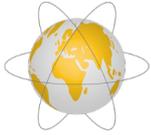


Figura 2.4.: Izquierda: bomba de Broad Street. Derecha: El mapa que el Dr. John Snow produjo a partir de casos de cólera en el área de Broad Street en Londres en 1854. La bomba de agua contaminada está marcada con una estrella amarilla en el centro del mapa. Los puntos rojos muestran los eventos de muerte; su tamaño varía según el número de eventos de muerte.



Figura 2.5.: Walter Christaller (1893 - 1969)

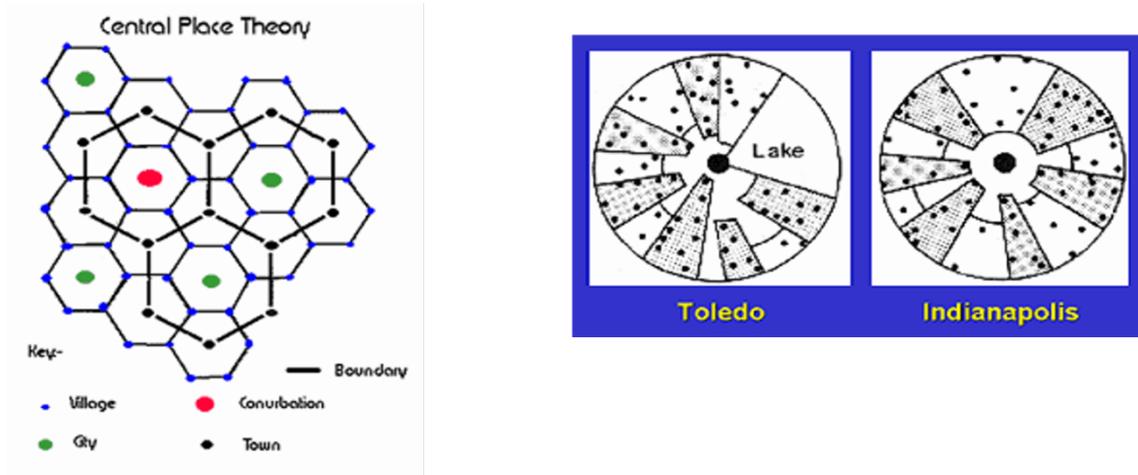
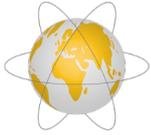


Figura 2.6.: Patrones Jerárquicos de Urbanización

Un lugar central, según Christaller (1933), es un asentamiento que sirve al área circundante con bienes y servicios. Su teoría del Lugar Central explica la distribución del tamaño de las ciudades (Figura 2.6). Christaller (1933) teoriza que las grandes ciudades no están dispersas al azar en el espacio, sino que tienen la máxima distancia posible entre sí. Esto se llama una distribución uniforme. Las ciudades medianas están llenando los vacíos, nuevamente en una distribución uniforme, y así sucesivamente. Al igual que otras teorías de ubicación de Weber y Von Thünen, se supone que las ciudades están ubicadas en un espacio homogéneo. El modelo de Christaller (1933) se basaba además en la premisa de que todos los bienes y servicios se compran en el lugar central más cercano, que las demandas de todos los lugares centrales de la llanura eran similares y que ninguno de los lugares centrales generaba ganancias excesivas.

2.4. Ian McHarg: superposición de mapas



Figura 2.7.: Ian McHarg (1920-2001)

Ian McHarg (Figura 2.7) fue un pionero del movimiento ambientalista. Estaba buscando argumentos que respaldaran sus ideas sobre una mejor integración del entorno natural en las ciudades. Pero no había ningún método para cuantificar y mostrar información sobre el entorno natural de manera significativa. Entonces, superpuso todo tipo de información espacial en hojas semitransparentes de papel delgado: el primer uso estratégico de las superposiciones de mapas. Juntas, estas capas permiten una evaluación intuitiva y holística de este paisaje.

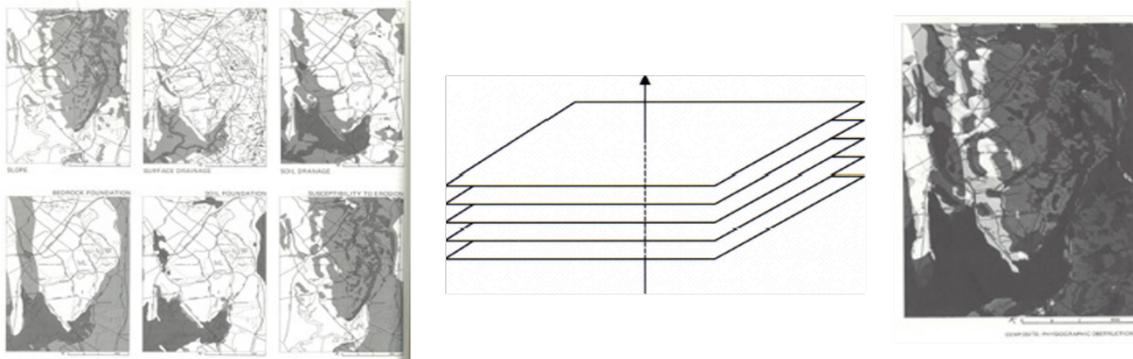


Figura 2.8.: Ian McHarg sugirió por primera vez superponer diferentes capas de mapas para generar nueva información. De: Diseño con la Naturaleza, Ian McHarg (1969).

McHarg demostró su enfoque con el ejemplo de un proyecto de construcción de carreteras muy controvertido en State Island, Nueva York. Trazó un mapa de múltiples valores naturales y sociales, incluidos el patrimonio histórico, el agua, los bosques, la vida silvestre, la belleza escénica, la recreación, los valores residenciales, institucionales y de la tierra. Para cada uno de estos valores dibujó un mapa. Los tonos de sombreado representan la severidad del impacto en ese factor. A continuación, todos los mapas semitransparentes se superpusieron unos sobre otros. Las áreas más oscuras mostraban las áreas con mayor valor social general y las más claras con menos, siguiendo el formato de cada capa individual. En la Figura 2.8 se pueden ver las hojas de papel originales extraídas del Libro de McHarg “Design with Nature” (1969), que supuso un hito en la conceptualización de los SIG.

2.5. Torsten Hägerstrand: espacio y tiempo

El geógrafo sueco Torsten Hägerstrand (Figura 2.9) se dedicó al desarrollo de nuevos conceptos y modelos de fenómenos espaciotemporales. Investigó el comportamiento y el movimiento de las personas en el espacio y el tiempo.

Para el análisis de las trayectorias de movimiento propuso la trayectoria espaciotemporal: un individuo se ubica en un plano bidimensional en un momento determinado. El tiempo está representado por el eje vertical, creando un cubo tridimensional de espacio-tiempo. Si el individuo no se mueve, el camino aparecerá como una línea vertical entre los tiempos de inicio y fin (Figura 2.10).



Figura 2.9.: Torsten Hägerstrand (1916 - 2004)

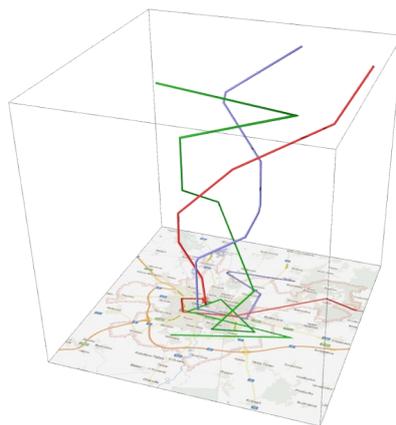


Figura 2.10.: Trayectoria espacio-temporal de tres individuos a través del espacio (eje x y) y el tiempo (eje z) en un cubo de espaciotiempo.

2.6. Waldo Tobler: la primera ley



Figura 2.11.: Waldo Tobler (1930 - 2018)

El concepto probablemente más citado en Geoinformática se conoce como la Primera Ley de la Geografía de Tobler: *“Todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes”* (Tobler 1970). Este concepto sorprendentemente simple es la base de prácticamente todos los métodos de análisis y estadísticas espaciales. Fue formulado por Waldo Tobler (Figura 2.11), un geógrafo y cartógrafo estadounidense-suizo. En una nota anecdótica, la famosa Primera Ley fue más un producto secundario en la página 3 de un artículo en el que Tobler presentó un modelo de simulación del crecimiento urbano de Detroit.

Además de la notable formulación de la Primera Ley, Waldo Tobler puede ser visto como un pionero de la Geoinformática en un sentido más estricto. Usó computadoras en su investigación geográfica desde fines de la década de 1950 y, por lo tanto, fue pionero en el campo de muchas maneras, especialmente en el modelado matemático y las interpretaciones (carto)gráficas.

2.7. Stan Openshaw: detección de grupos

Stan Openshaw (Figura 2.12) y sus colegas aplicaron su Máquina de análisis geográfico para analizar las incidencias de leucemia infantil en el norte de Inglaterra entre 1968 y 1985. Este es otro gran ejemplo del análisis espacial de los primeros días.

En el análisis se utilizaron dos conjuntos de datos:

- Uno que contiene las ubicaciones de los casos de la enfermedad,
- El otro proporciona el número de personas en riesgo en las zonas estándar de informes del censo.

El método genera una gran cantidad de círculos invisibles de tamaños aleatorios y los arroja al azar sobre el mapa. Se dibuja un círculo, si el número de casos que encierra supera considerablemente el número de los esperados en esa zona, dado el tamaño de la población en riesgo. En la Figura 2.13 puede ver grupos que resultaron del análisis de casos de leucemia alrededor de una planta de energía nuclear.



Figura 2.12.: Stan Openshaw (nacido en 1946)

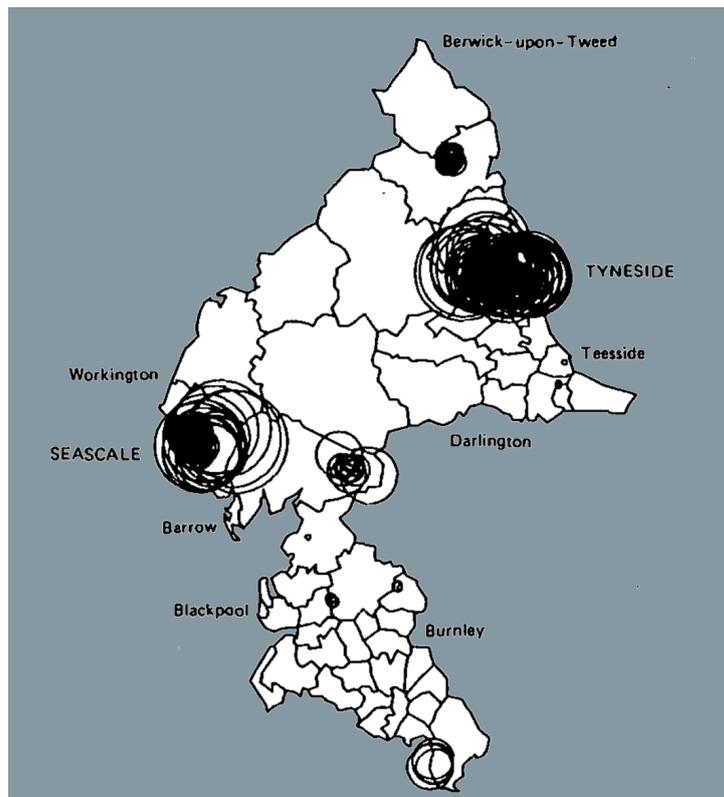


Figura 2.13.: Uno de los primeros SIG fue la Máquina de análisis geográfico de Stan Openshaw. Aquí, esta aplicación mapea grupos significativos de leucemia alrededor de una planta de energía nuclear en Sellafield, al norte de Inglaterra (Openshaw et al. 1987).

2.8. Michael Goodchild



Figura 2.14.: Michael Goodchild (nacido en 1944)

Ninguna revisión del desarrollo histórico de nuestro campo puede ignorar a Michael Goodchild (Figura 2.14), quien acuñó el término Ciencia de la Información Geográfica (Goodchild 1992). Con este influyente artículo, Michael Goodchild, un geógrafo británico-estadounidense, definió el campo como una disciplina científica independiente y describió por primera vez su agenda de investigación.

2.9. Cuestionario

En el Quiz de la Figura 2.15, empareje las tarjetas de los pensadores espaciales (puntos naranjas) con las tarjetas de conceptos espaciales (puntos azules) que propusieron. Las cartas se vincularán una vez que coloques una encima de la otra. Compruebe si su solución es correcta haciendo clic en el icono de casilla de verificación azul en la parte inferior derecha.

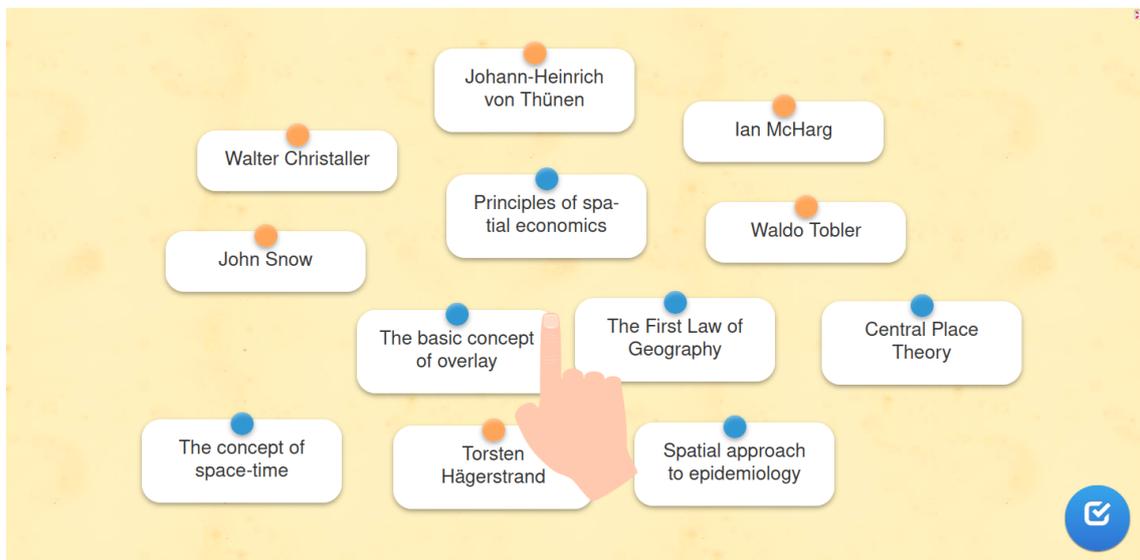


Figura 2.15.: Cuestionario: Empareje a los pensadores espaciales con los conceptos que han aportado.: [Acceder](#)

3. ¿Cómo entonces definir los SIG?

La definición de SIG ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo según las necesidades, por lo que pueden ser definidos de diferentes formas.

- ¿Los SIG son una herramienta o una ciencia?,
- ¿O son únicamente un negocio?,
- ¿Es una tecnología para la resolución de problemas o es simplemente un sistema para la generación de mapas?,
- ¿Qué son los SIG?

En esta parte vamos a dar respuesta a estas preguntas y centrarnos en la definición del término SIG.

3.1. ¿Qué es la información geográfica?

La información geográfica es información sobre un elemento en la superficie de la Tierra, es el conocimiento sobre 'dónde' está algo o 'qué hay' en un determinado lugar.

Características de la información geográfica, que la hacen tan especial:

- Es **multidimensional**: mediante dos coordenadas puede definirse cualquier posición (x, y o latitud, longitud).
- Normalmente es relativamente **estática** –las características naturales y muchas características de origen humano no suelen variar rápidamente–.
- Dependiendo 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 (como información sobre el clima en una gran extensión, o la densidad de población en un país entero)
- Puede ser muy **voluminosa** –por ejemplo: un solo satélite emite cada día un volumen de datos del valor de un terabyte. Se necesitan varios gigabytes 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.
- Debe ser **proyectada** a menudo en una superficie plana.
- El **análisis** de la IG requiere métodos especiales y conlleva un tiempo.
- Aunque la mayoría de la información geográfica es estática, el proceso de **actualización** es viable, pero complejo y caro.
- Visualizar la IG en formato de **mapas** requiere la recuperación de gran cantidad de datos.

Cuando la Información geográfica es expresada en formato digital, la información está codificada en un alfabeto que utiliza solamente dos valores o bits: 0 y 1. De esta forma los datos son representados como secuencias de bits. Cuando creamos un paquete de información geográfica en formato digital, éste se parece a cualquier otro paquete de información. Con la misma tecnología se pueden manejar muchos tipos de información. Por ejemplo: una memoria portable tipo flash o un DVD puede almacenar palabras, números, mapas, sonidos, ... En la actualidad, a través de Internet, se puede transmitir cualquier tipo de información.

3.2. Datos geográficos

Entonces, ¿Qué tienen de especial los datos espaciales/geográficos? Recuerda que los datos geográficos son datos sobre cosas y fenómenos en la superficie de la Tierra o en sus cercanías que responden a las preguntas:

- ¿Dónde pasó algo?
- ¿Qué sucedió en un lugar determinado?
- ¿Cuándo pasó algo?

3.2.1. Geometría

Como se muestra en la Figura 3.1, el componente de ubicación de los datos geográficos se refiere a la geometría de un objeto espacial real (por ejemplo, una carretera) o abstracto (por ejemplo, un límite administrativo).

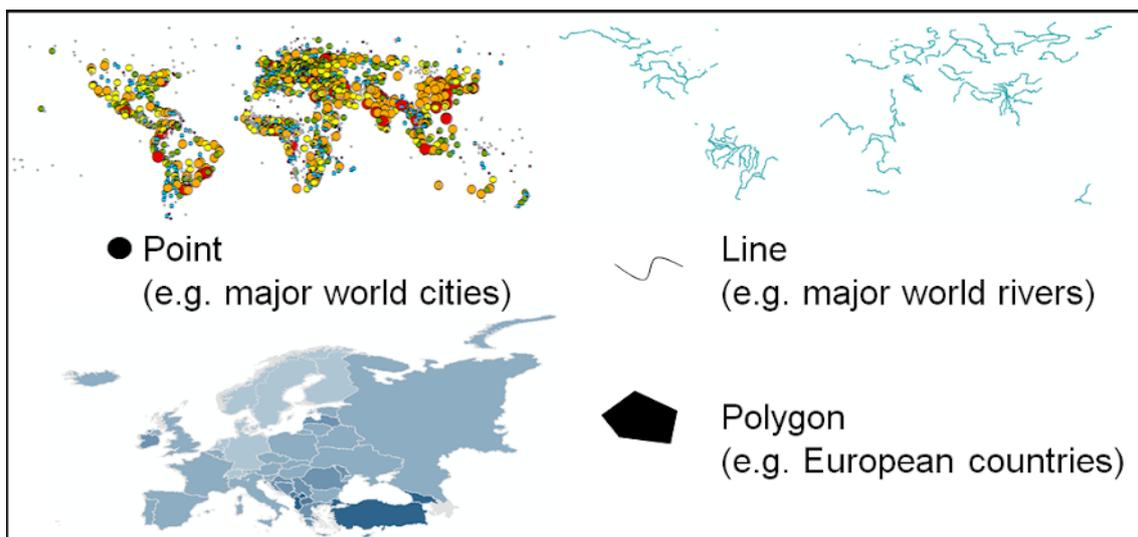


Figura 3.1.: Tipos de datos geográficos

Los siguientes tipos geométricos se distinguen por su dimensionalidad:

- **Punto**: objeto de dimensión 0 que representa generalmente un punto central de una cosa o fenómeno (por ejemplo, postes de electricidad, alcantarillas o ciudades).

- **Línea:** representación unidimensional de objetos lineales (por ejemplo, carreteras, tuberías o ríos).
- **Polígono:** representación bidimensional de objetos de área (por ejemplo, límites de países, uso de la tierra)

3.2.2. Datos de atributos

Los datos geográficos conectan la ubicación, los atributos y el tiempo. Así los datos no espaciales en forma de texto, estadísticas, medidas, nombres, etc. pueden ser asignados a una ubicación; los llamamos datos de atributos.

Los atributos deben asignarse claramente, de manera lógica y sin ambigüedades, a una ubicación en particular. Estos atributos se miden en diferentes escalas de medida (Stevens & others, 1946): nominal, ordinal, de intervalo y de razón.

Los datos nominales se clasifican según su calidad o tipo, y son discretos. Los valores alfanuméricos se utilizan para etiquetar diferentes clases, pero estas etiquetas no indican la clasificación. Los datos nominales pueden clasificarse y compararse (verifique la “igualdad”). Por ejemplo, un punto puede representar un aeropuerto o un pueblo o una mina; una línea puede representar una carretera o un oleoducto; y un polígono puede ser un uso de suelo diferente.

Los datos ordinales describen valores relativos como rango o jerarquía y también implican calidad. Entonces, las cosas pueden ser pequeñas o grandes, bajas o altas, pero no podemos decir cuánto es “alto” más alto que “bajo” porque no se les asignan valores numéricos específicos. Un ejemplo de datos ordinales es un sistema de clasificación de carreteras como autopista/carretera principal/secundaria.

Los datos de intervalo son cuantitativos y, por lo tanto, incluyen valores numéricos. Estos se pueden clasificar y organizar a lo largo de una escala utilizando alguna unidad estándar. Por lo tanto, es posible calcular la diferencia entre los valores clasificados expresados en una unidad estándar elegida. Un ejemplo es una escala de temperatura en grados como unidad de medida estándar ($^{\circ}\text{C}$ – Celsius o $^{\circ}\text{F}$ – Fahrenheit). Podemos afirmar que hay una diferencia de 16°C entre 16°C y 32°C , pero 32°C no es el doble de caliente que 16°C porque la escala de medición es arbitraria. Los valores están ordenados en la escala donde 0°C corresponde al punto de congelación del agua, que corresponde a 32°F . Por tanto, 0°C es un cero arbitrario, es decir, fijado por un acuerdo.

Los datos de razón son los mismos que los datos de intervalo, excepto que se pueden expresar como razón y tienen un cero absoluto (a veces también llamado cero natural). Ejemplos de tales datos son las medidas físicas de longitud, altura (por ejemplo, [m] o [ft]) o peso ([kg] o [lb]). Para este tipo de medidas tiene sentido afirmar que algo es el doble de largo o pesado sin importar las unidades porque estos datos tienen cero absoluto o punto de partida.

Nota: Un cero natural es un punto de partida no arbitrario para los datos. Por ejemplo, una medida de distancia en unidades cero no tiene longitud; además, tiene sentido afirmar que dos metros son el doble de largo que un metro. Mientras que, con la medida del tiempo, el año cero es arbitrario. Esto significa que es incorrecto afirmar que el año 2000 es el doble que el año 1000.

3.3. Tecnologías de la Información Geográfica

Las Tecnologías de Información Geográfica (TIG) son tecnologías útiles para la obtención y el procesado de información geográfica. Existen tres tipos de tecnologías principales o más comunes:

- Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite (GNSS)
- Teledetección y sensores remotos
- Sistemas de Información Geográfica (SIG)

3.3.1. Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite (GNSS)

Los GNSS (*Global Navigation Satellite System*) son sistemas de satélites utilizados para determinar la posición geográfica de un usuario receptor en cualquier lugar del mundo. Actualmente el más conocido de los sistemas es el GPS, o Sistema de Posicionamiento Mundial.

El GPS es un sistema de 31 y más satélites en órbita con trayectorias sincronizadas que cubren la superficie de la Tierra (ver Figura 3.2). Proveen señales disponibles en cualquier parte de la Tierra, las 24 horas del día, pudiendo ser utilizado para determinar el momento preciso y la posición de un receptor GPS en tres dimensiones.

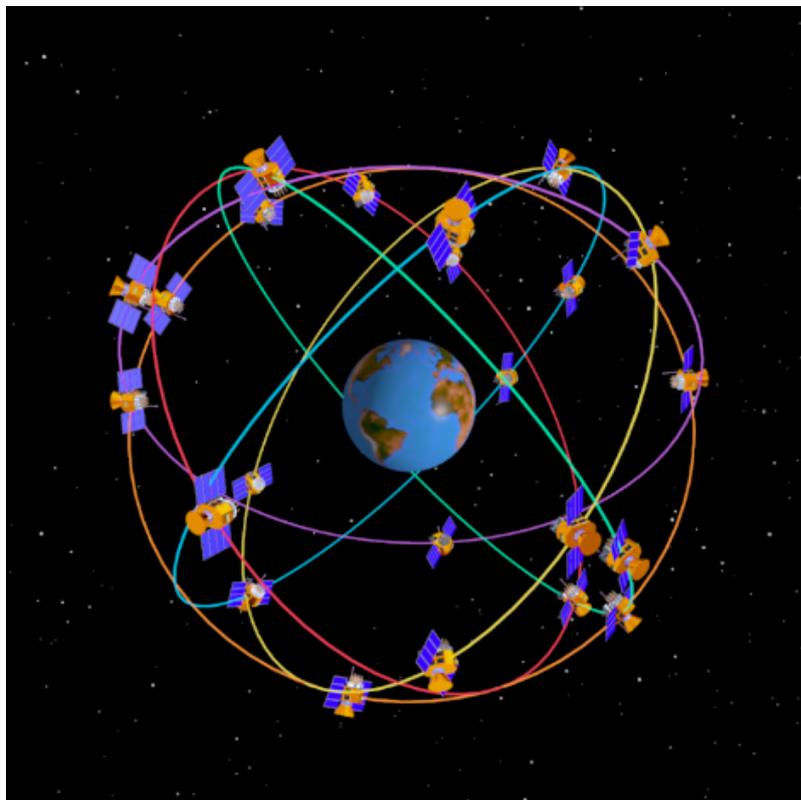


Figura 3.2.: Sistema de satélites GPS. Fuente: Linux Journal

El GPS fue fundado y controlado por el Departamento de defensa de los Estados Unidos, pero puede ser utilizado por ciudadanos para georreferenciar posiciones, para la navegación

y para el control de tiempo y frecuencia. Actualmente Rusia tiene un sistema propio llamado GLONASS y la Unión Europea, mediante el programa GALILEO, inició operaciones en el año 2016.

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.

Las señales son recibidas por el usuario a través de un aparato electrónico especial. Actualmente existen en el mercado aparatos portátiles de pequeño tamaño. A través de este aparato se obtienen mediciones de posiciones en la superficie terrestre. La localización es expresada en latitud y longitud, u otro sistema estándar, que veremos más adelante en este mismo módulo.

El uso del GPS está aumentando como sistema de obtención de datos en los Sistemas de Información Geográfica para la localización precisa de los datos espaciales y la obtención de datos de campo. El uso efectivo de un sistema GPS necesita aprendizaje, un equipamiento apropiado y conocimiento de las limitaciones del sistema.

3.3.2. Teledetección y sensores remotos

La Teledetección o percepción remota es la técnica que permite la obtención de información de la superficie terrestre a partir del análisis automático de los datos obtenidos de forma remota. Las imágenes de satélite, fuente de datos para la teledetección, son capturadas a través de sensores.

Los sensores remotos, situados en los satélites que orbitan la Tierra, se utilizan para capturar información sobre la superficie terrestre y la atmósfera. Los sensores varían según el nivel de detalle que permiten visualizar, y el rango del espectro electromagnético que detectan. Las señales son transmitidas a estaciones receptoras en la Tierra, donde son transformadas y difundidas como imágenes digitales.

En la Figura 3.3 vemos representadas Imágenes del satélite LandSat-7. Interpretar la información que ofrecen no siempre es fácil. A la izquierda el Mt. Etna, situado en la isla italiana de Sicilia, uno de los volcanes más activos del mundo. En esta imagen del 2001 se observa el volcán en erupción, la salida de humo del cráter y el avance de lava oscura por sus pendientes. En la imagen de la derecha vemos el desierto de Atacama, en el norte de Chile, uno de los más secos en el pie de los Andes. Aquí confluyen pequeños lagos de sal con sedimentos minerales que dan lugar a volcanes blancos.

3.4. Definiciones de SIG

El término de sistema de información geográfico tiene diferentes significados:

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

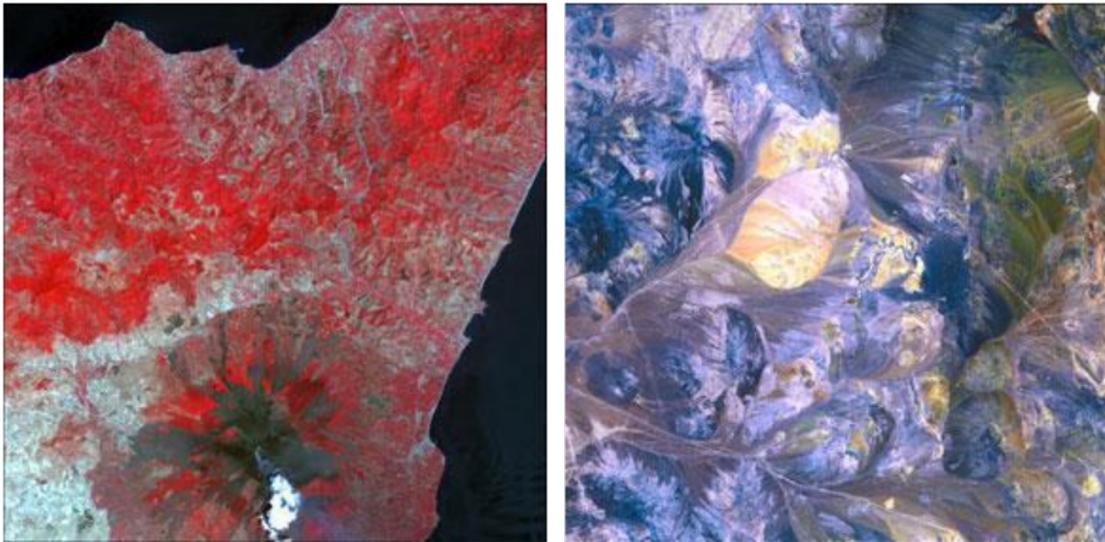


Figura 3.3.: Imágenes del satélite LandSat-7. Fuente: <http://eros.usgs.gov/imagegallery/>

- 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.

La geografía se define como el estudio de la Tierra y las sociedades.

$$SI + G = ¿SIG?$$

Los SIG son en esencia sistemas de información, pero ¿qué tecnologías son llamadas SIG, y cómo estas consiguen sus objetivos?, ¿Hasta qué punto es un SIG más que una tecnología, y por qué atrae tanto interés como tema de revistas científicas y conferencias en los últimos años?

A lo largo del tiempo se han propuesto diferentes definiciones de SIG, pero ninguna de ellas ha sido completamente satisfactoria. En la actualidad las diferentes definiciones de SIG se basan en el software, los datos, las comunidades SIG o al hecho de trabajar con SIG. Escoger un concepto u otro depende del contexto en el que se usa.

Chrisman (1999), citado por Harvey (2015), define los SIG según las funciones que permiten, de modo que define los SIG como las acciones organizadas con las que las personas miden aspectos de fenómenos y procesos geográficos, los representan para enfatizar temas espaciales, entidades y relaciones, operan bajo estas representaciones, descubren nuevas relaciones mediante la integración de diferentes fuentes y transforman estas representaciones.

Burrough, McDonnell, y Lloyd (2015), en cambio, recoge definiciones basadas en tres categorías:

- Una poderosa “caja de herramientas” para la recolección, almacenamiento, recuperación, transformación y visualización de datos del mundo real.

- Un sistema de bases de datos en el que la mayoría de los datos están indexados geográficamente y con los que se pueden realizar un conjunto de procedimientos con el objetivo de dar respuesta a consultas sobre entidades espaciales en la base de datos.
- Una entidad institucional con estructura organizacional que integra tecnología con bases de datos, expertos y ayuda económica continuada.

De otro lado, los SIG pueden ser definidos dependiendo de los grupos de personas que los utilizan:

- Un contenedor de mapas digitales (el público general).
- Un conjunto de herramientas para la resolución de problemas geográficos (gestores, planificadores).
- Un sistema de ayuda para la toma de decisiones espaciales (gestores científicos e investigadores).
- 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 llevar a cabo operaciones con datos espaciales que de hacerse manualmente serían demasiado pesados, costosos o imprecisos (gestores de recursos, planificadores, cartógrafos).

3.5. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta

Los SIG son sistemas para la entrada, almacenaje, manipulación y salida de información geográfica. Los SIG se consideran también una clase de software. Un ejemplo práctico de un SIG combina software con hardware, datos, usuarios y procedimientos. Los SIG demuestran su especial efectividad en resolver problemas, al servir de soporte para la toma de decisiones y ayudar a la planificación.

Un SIG es una clase específica de sistema de información. Los sistemas de información son utilizados para manipular, resumir, consultar, editar, visualizar, ..., de forma general, para trabajar con información almacenada en bases de datos informatizadas. Por ejemplo: los sistemas de información utilizados por las aerolíneas y las agencias de viajes para las reservas, el “Check in” de los pasajeros, etc.

Vistos como herramienta, los SIG son un conjunto de funciones o componentes interrelacionados que forman un todo, es decir: obtiene, procesa, almacena y distribuye información (datos manipulados) para apoyar la toma de decisiones y el control en una organización. Igualmente apoya la coordinación, análisis de problemas, visualización de aspectos complejos, entre otros aspectos.

Los SIG utilizan información espacial sobre qué y dónde en la superficie terrestre. Esta información es procesada en los ordenadores según su tipología:

- números: suma, resta, multiplicación, ...
- texto: procesadores de texto, creación, edición, envío, recepción, ...

- imágenes: procesadores de imagen, ...
- listas, tablas: hojas de cálculo, ...
- mapas e imágenes de la superficie terrestre: en SIG.

3.6. ¿Cómo reconocer qué es un SIG?

Una vez tenemos claro lo que es un SIG, cabe plantearse cómo vamos a reconocerlo. Esta cuestión puede tener dos significados distintos:

- El SIG es un sistema aplicado a una realidad, incluyendo hardware, datos, software y las personas necesarias para resolver un problema. El hardware en un SIG es como el de cualquier sistema (teclado, monitor, cables, conexión a Internet, etc.), y puede tener algunos otros componentes más específicos (grandes impresoras y *plotters* para las salidas, escáneres para la captura de datos a partir de mapas, digitalizadores, etc.). Pero no todos los SIG necesitan estos componentes de hardware. Lo importante es el tipo de información que se almacena, es decir, el contenido de mapas e imágenes. De esta forma, podemos reconocer que un sistema es un SIG porque los datos que almacena incluyen información espacial. El SIG además incluye herramientas para manipular esta información, y permite funciones especiales para trabajar con la información geográfica, como visualizar en pantalla, editar, modificar, transformar, medir distancias y áreas, combinar mapas, etc. Pueden permitir también otras funciones más sofisticadas como mantener inventarios, gestionar propiedades, juzgar lo apropiado de los propósitos en diferentes áreas, ayudar a los usuarios a tomar decisiones sobre lugares para planificación, hacer predicciones sobre el futuro. Estas funciones más especializadas requieren técnicos expertos en SIG para llevarse a cabo.
- El SIG es un tipo de software. En este caso, las funciones del SIG son parte de este software. El usuario combina el software con sus propios datos y realiza diferentes funciones. Este software ha sido probablemente suministrado por una compañía especializada en SIG. El precio de este tipo de software puede variar entre los 60€ y los 60.000 €. En la actualidad existen diferentes proveedores de software SIG, algunos especializados en SIG y otros que ofrecen SIG como uno más de sus productos en el mercado. También existen alternativas de SIG basados en licencias de software libre, que se analizarán más adelante en este módulo.

3.7. Sistemas, ciencia y estudio

Después de años de intenso debate, la comunidad científica está aún dividida entre aquellos que defienden la existencia de las ciencias de la información geográfica, y aquellos que perciben los SIG como meras herramientas para la resolución de problemas. A continuación, se comenta el porqué de este interesante debate.

El problema empieza al formular la siguiente pregunta: ¿Qué significa “estoy haciendo SIG”? El significado de esta pregunta puede ser:

- “Estoy utilizando las herramientas de los SIG para solucionar un problema”.
- “Contribuyo a construir las herramientas”, añadiendo funcionalidades a la tecnología de información geográfica, o desarrollando o inventando nuevas herramientas.
- “Estudio la teoría y conceptos relacionados con los SIG y las otras tecnologías de información geográfica”, según esto último, existiría el SIG como ciencia.

Para los defensores de la Ciencia de la IG, el término SIG se formula a partir de la suma de las 3 perspectivas: Sistemas, Ciencia y Estudio (*Systems, Science and Studio* en la Figura 3.4).

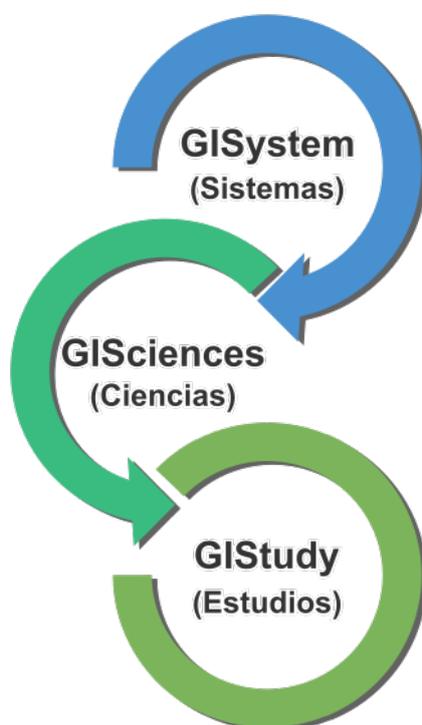


Figura 3.4.: Las tres perspectivas o engranajes de los SIG. Fuente: Adaptado de Longley et al., 2005

3.8. La ciencia de la información geográfica

La ciencia de la información geográfica es aquella que está detrás de la tecnología. Considera cuestiones basadas en el uso de los sistemas y las tecnologías. Es un campo multidisciplinario, ya que se nutre de diferentes disciplinas: cartografía, geodesia, fotogrametría, y recientemente se consideran otras áreas, como la estadística espacial o la psicología cognitiva.

Las grandes **preguntas de la Ciencia de la IG:**

- La representación de la superficie terrestre y las relaciones que se establecen entre esta representación y el usuario.

- Modelos de datos y estructuras, eficiencia e interoperabilidad.
- Visualización de datos geográficos.
- Herramientas de análisis de datos especiales.

El Consorcio de Universidades por la Ciencia de la Información Geográfica (www.ucgis.org) es un grupo fundado en 1991 de más de 30 universidades y asociaciones profesionales para la promoción de la Ciencia de la IG. Grupos similares han surgido en los últimos años en los cuáles se desarrollan avances y nuevas preguntas sobre el qué hacer de los SIG.

Lección II.

Origen y Aplicaciones de los SIG

Presentación de la Lección 2

Objetivos de la lección

Al final de esta lección Ud. tendrá conocimiento de cómo se aplican de manera integral en la vida de prácticamente todos nosotros y del espacio que nos rodea. Tendrá una introducción al cómo se organizan las ideas alrededor de los proyectos que involucran el uso de los SIG.

Al completar esta lección se espera que usted pueda...

- Conocer el proceso de creación de datos, su edición y procesamiento
- Comprender las limitaciones de la representación del entorno con los SIG.
- Conocer algunos ejemplos concretos del uso de los SIG
- Identificar la importancia de los SIG en los procesos de toma de decisiones

Resumen de la lección

Los SIG son fundamentalmente aplicaciones de trabajo, en esta lección podremos adquirir una idea de cómo los SIG pueden ser utilizados para la resolución de problemas espaciales. Veremos algunas de las implementaciones más generalizadas muchas de las cuales afectan nuestra vida diaria. Cómo se emplean las aplicaciones y cómo se aplican en el mundo real las prácticas científicas, los objetivos de la resolución de problemas y cómo se pueden usar para estudiar y resolver problemas en transporte, medio ambiente, gobierno local, negocios, etc. Depende de cada especialidad y del acuerdo que la sociedad particular tenga para el manejo de la información.

El listado de los campos en el que pueden desarrollarse las aplicaciones SIG es enorme, y conocer algunas de estas aplicaciones puede ser el punto de partida para que Ud. como estudiante investigue los diferentes casos de estudio que son interesantes y relevantes para su campo de trabajo diario.

En esta lección se hará énfasis en la utilidad y efectividad de los SIG en la sociedad actual y se enlistarán algunas de las implementaciones y aplicaciones de los SIG en diferentes sectores, desde administraciones, catastro y planificación, transportes, compañías de servicios, medio ambiente, agricultura, manejo de riesgos naturales, salud pública, geomarketing, etc.

Nos inmiscuiremos en el importante papel de los SIG para la resolución de problemas. En esta lección se han introducido los conceptos de Sistemas de Soporte a la toma de Decisiones Espaciales. Un SSDE es definido como un sistema interactivo, informatizado,

diseñado para ayudar a los usuarios a conseguir la mayor efectividad en los procesos de toma de decisiones para resolver problemas semiestructurados de decisiones espaciales.

4. El origen de los SIG

Hace 40 años, Roger Tomlinson (2007)⁴ diseñó el primer Sistema de Información Geográfica. Desde entonces, varias cosas interesantes han pasado en la corta historia de los SIG. Pero ¿cómo empezó todo? Esta sección pretende dar respuesta a esta pregunta, y hacer un breve repaso a la historia de los SIG desde sus inicios, en 1960, para ayudarnos a entender la situación actual. Vamos a conocer algunos de sus pioneros, científicos clave y emprendedores que hicieron de los SIG lo que son en la actualidad.

Los SIG tal y como los conocemos, no se diseñaron hasta los años 60. A partir de esta fecha los SIG han experimentado un importante desarrollo, debido al empuje de diferentes organizaciones e individuos.

La teledetección ha tenido un papel importante en la historia de los SIG, como fuente de tecnología y fuente de datos. Los primeros satélites fueron desarrollados en los años 50, con fines militares. Las necesidades militares fueron responsables también del comienzo del desarrollo del Sistema de Posicionamiento Mundial (GPS).

- **Años 60 - La era de la innovación:** En esta era de innovación, Roger Tomlinson, considerado como 'el padre del SIG', creó el CGIS (Canada Geographic Information System) para el Canadian Land Inventory (Tomlinson 2007). Este primer SIG fue diseñado a mediados de los años 60 como un sistema de medición de mapas computarizado (Figura 4.1).



Figura 4.1.: Primer SIG de la historia. Fuente: [Geogratis](#)

Más tarde, Howard Fisher, un arquitecto norteamericano, empezó a trabajar con sistemas de mapas informatizados y estableció el primer Laboratorio de Gráficos Informatizados y

Análisis Espacial en la Universidad de Harvard. En 1969 dos estudiantes de este laboratorio de Harvard formaron la empresa **ESRI**, muy conocida en la actualidad, para el desarrollo de proyectos SIG. El libro *‘Design with Nature’* de L. McHarg (1969) fue el primero en describir diferentes conceptos de análisis modernos mediante SIG. Algunos productos SIG más específicos se basan en los principios de Ian McHarg.

- **Años 70 - Dominio del Laboratorio de Harvard:** Durante los años 70 el Laboratorio de Harvard tuvo gran influencia en el desarrollo de los SIG. En 1972 se lanza el **Landsat 1**, originalmente llamado ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*), el primer satélite de teledetección de la superficie terrestre.
- **Años 80 - La comercialización:** Es en los años 80 cuando empieza realmente el despliegue de los SIG, debido a la disminución de precios de los ordenadores, que llega a niveles que permiten sostener una industria significativa de software. Los primeros clientes de productos SIG fueron empresas forestales y agencias de recursos naturales, por la necesidad de mantener la información y regular el uso eficiente de los recursos. Sin duda, los beneficios de la gestión y la toma de decisiones utilizando las herramientas SIG eran superiores a los elevados costes de implantación del sistema. El mercado del software continuó creciendo con rapidez, el precio del hardware siguió cayendo, por lo que el poder de los SIG y su industria siguieron aumentando hasta la actualidad. En el campo académico se publicó la primera colección de artículos y el primer libro específico en SIG: *“Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment”*, de Peter Burrough. Este fue considerado, con rapidez, como el libro de referencia para los estudiantes de SIG del mundo entero.
- **Años 90 - El gran negocio:** Durante los años 90, los distribuidores de software dominaron la escena de los SIG. RADARSAT, un avanzado proyecto de satélite de observación terrestre fue desarrollado en Canadá para monitorizar el cambio climático y favorecer la sostenibilidad de los recursos. En 1993 se establece en Europa **EUROGI**, una organización no gubernamental que representa la comunidad de Información Geográfica europea («EUROGI – European Umbrella Organisation for Geographic Information» 2010). El objetivo de EUROGI fue maximizar la disponibilidad y el uso efectivo de la Información Geográfica en Europa. Un año más tarde, se crea el **Open Geospatial Consortium** (Reichardt 2017) que agrupa más de 250 organizaciones públicas y privadas. Está formado por distribuidores, agencias gubernamentales y usuarios, con el objetivo de mejorar la interoperabilidad. En esta década, se producen importantes avances en las interfaces de usuario de los programas informáticos, que facilitan la utilización de los SIG. El consorcio pretende la definición de estándares abiertos e interoperables dentro de los Sistemas de Información Geográfica. Persigue acuerdos entre las diferentes empresas del sector que posibiliten la interoperabilidad de sus sistemas de geoprocesamiento y facilitar el intercambio de información geográfica en beneficio de los usuarios.

“El crecimiento de los SIG ha sido un fenómeno de marketing de una amplitud y profundidad sorprendente y va a seguir así por varios años. Claramente, los SIG se van a integrar en nuestras vidas diarias de tal forma que pronto nos será imposible imaginar cómo funcionábamos antes” Clarke (2011)

- **A partir del 2000: La era de la explotación:** Durante la primera década el fuerte desarrollo de las tecnologías de la información, Internet, las tecnologías móviles y

los sistemas de posicionamiento, están propiciando la expansión del software SIG, la demanda de datos cartográficos y los servicios basados en la localización. En 2004 nace el proyecto **INSPIRE**, una iniciativa de la UE que tendrá en cuenta normas técnicas y protocolos, aspectos de coordinación y organizacionales, aspectos de política de datos, como el acceso a los datos, y la creación y mantenimiento de la información espacial (Mijić y Bartha 2018). El objetivo de INSPIRE es conseguir que esté disponible la información geográfica relevante, armonizada y de calidad, para apoyar la formulación, implementación, seguimiento y evaluación de las políticas comunitarias con dimensión o impacto territorial. Aunque los servicios basados en la localización han surgido hace pocos años, el desarrollo en los mercados es tremendo. Además, muchos informes apuntan que el desarrollo de los *Local Based Services* (LBS) es mucho más rápido que el de los SIG, aunque en esencia, como veremos, son inseparables.

Durante el 2004, el software alcanzó más de la mitad de los ingresos totales. Los proveedores líderes son ESRI, Bentley e Intergraph, responsables del 50% de las ventas. Las empresas que les preceden son Autodesk, Leica Geosystems, GE y MapInfo. La venta de datos cartográficos, en rápido crecimiento, representó unos 530 millones de euros. Finalmente, las ventas en servicios ascendieron a 420 millones de euros, y el hardware a 90 millones de euros. En el estudio de Daratech llamado *GIS/Geospatial Markets and Opportunities*, se pone de manifiesto el crecimiento del mercado SIG y Geoespacial, que creció un 17% en 2005. Se estimó que para 2006 los ingresos hayan podido alcanzar los 2.800 millones de dólares. Los ingresos están creciendo con rapidez, especialmente en el sector público, incluyendo la administración local. Para el 2010 las ventas de GIS y software geoespacial, servicios y datos ha crecido en un 10% alcanzando un total de \$4.4 billones.

En esta última década (2010 – 2020) hemos sido testigos del surgimiento de la neo-geografía y el desarrollo de tecnologías como Virtual Globes (globos virtuales), Geogames, Cloud Computing (servicios en la nube), Volunteered Geographic Information (Información geográfica voluntaria o participativa) y Web 2.0. La tendencia en los últimos años se ha enfocado en crear e implementar grandes servidores que se acceden a través del Internet. De este modo los “servicios en la nube” se caracterizan por una estructura dinámica y escalable, ofreciendo al usuario alta fiabilidad, tiempos de respuesta rápidos, así como la flexibilidad de poder manejar sus demandas. Una de las ventajas de este tipo de servicio es la posibilidad de dar soporte a usuarios individuales o a organizaciones. Es importante tanto mencionar, que en los últimos años una gran cantidad de usuarios privados se han involucrado en el proceso de creación y difusión de la información geográfica, a esto se lo conoce como “información geográfica voluntaria”, y con esto se ha logrado que actualmente hayan alrededor de cinco millones de usuarios de la información geográfica.

4.1. Aplicaciones de los SIG

Cada vez más y más individuos y organizaciones del sector público y privado se encuentran utilizando los SIG para dar respuesta a la pregunta fundamental: *¿dónde?* Su uso se demuestra en numerosas aplicaciones de gestión de recursos, análisis de alternativas, herramienta de soporte en la toma de decisiones y planes de actuación frente a diversidad de situaciones.

Además de la ayuda que puede significar el uso de los SIG, la aparición de nuevas aplicaciones geográficas a través de Internet ha permitido el impulso de la comunicación en situaciones en las que la localización espacial es esencial. La aparición de nuevas aplicaciones SIG que permiten la interacción de diferentes usuarios en tiempo real ha abierto nuevas posibilidades en la utilización de este tipo de recursos. Existe gran variedad de campos y áreas temáticas en los que pueden obtenerse los beneficios de los SIG. ¿Por qué complicarse con la implantación de un SIG?, ¿Quién necesita saber dónde se encuentra qué? A continuación, se presentan algunas de las aplicaciones actuales en diferentes instancias y áreas del conocimiento:

4.1.1. E-Government

Con e-Government o gobierno en línea, se determina la actual fase del apoyo automatizado del proceso de datos en la administración pública. Está marcada particularmente por el potencial transfronterizo de las tecnologías de información de hoy – no por último de las tecnologías de internet – para una optimización de las relaciones de comunicación y datos entre las autoridades. El e-Government además posibilita nuevas interfaces para el servicio al ciudadano. Igualmente, en esta base también son posibles los servicios de información y análisis basados en la geo información. Los Geodatos proporcionan una base excelente, aunque todavía poco usada en la práctica. A través de ellos es posible conectar los datos específicos relacionados a terrenos y espacio, entre los diferentes sectores de la administración. Los sucesos dinámicos y su distribución espacial en las áreas de responsabilidad pública, de este modo se tornan mejor reconocibles, fáciles de visualizar, analizables y fáciles de diseñar.

Los conocimientos presentes en los numerosos y muy variados sectores de la administración pública, a través de los Geodatos pueden ser acoplados, y pueden ser utilizados de una mejor forma. De ello se benefician la toma de decisiones, los procesos de participación, el trabajo público y la evaluación, en prácticamente la totalidad de los campos de trabajo público – desde la ordenación territorial, el urbanismo, la protección del medio ambiente y estadística hasta la administración educativa y social o la seguridad interna. Al mismo tiempo, los Geodatos presentes en las autoridades son un bien económico valioso que es indispensablemente necesario para la activación acelerada del mercado de la geo informática. Sin embargo, todavía es necesario desarrollar modelos de colaboración pública y privada que posibiliten una interacción regulada de la administración pública y la economía, para el beneficio mutuo, finalmente para el bien del ciudadano.

En los últimos años se han desarrollado varias aplicaciones usando las tecnologías Web 2.0 que permiten una interacción más estrecha entre ciudadanos y la administración pública, como por ejemplo [seeclickfix](#)

Varios de los asuntos que competen al sector público y de gobierno incluyen:

4.1.2. Catastro y planificación

El acceso al territorio y su uso es fundamental para el mantenimiento de nuestras vidas tal y como las conocemos: alimentación, vivienda, recreación, etc. La parcela de territorio es

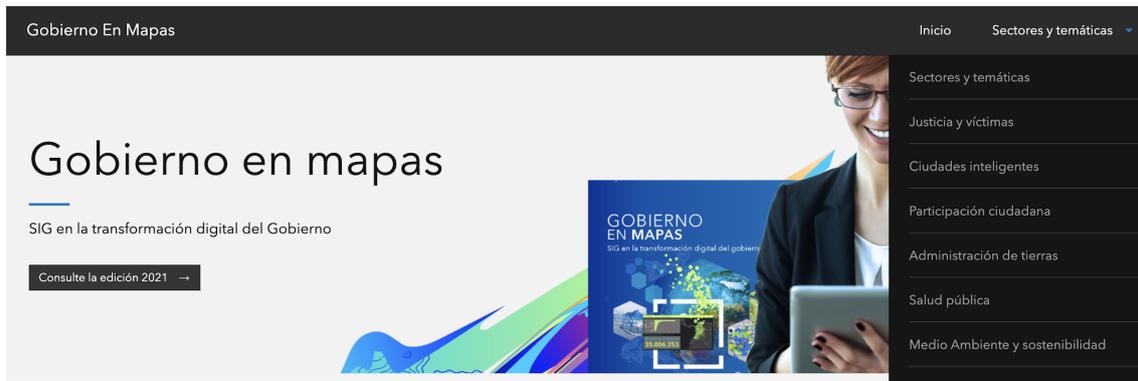


Figura 4.2.: Componentes y áreas de aplicación del E-Government. Fuente: [ESRI COLOMBIA](#)

la unidad básica para el acceso, el control y la toma de decisiones en el terreno. La información actualizada y fiable del territorio se hace necesaria en muchos ámbitos: planeamiento territorial, desarrollo de infraestructuras y mantenimiento, protección ambiental y gestión de recursos, servicios de emergencia, programas de asistencia social, entre otros. Además, es la base para el comercio, el desarrollo y otras actividades económicas. Los objetivos de mantener la información catastral y territorial radican en obtener una descripción legal de la propiedad en sistemas referenciados, para evitar problemas de límites ambiguos o superpuestos, para describir relaciones complejas y para permitir el acceso al público. Una de las aplicaciones más avanzadas es el catastro en línea de Bogotá, Colombia: catastro-bogota.gov.co/

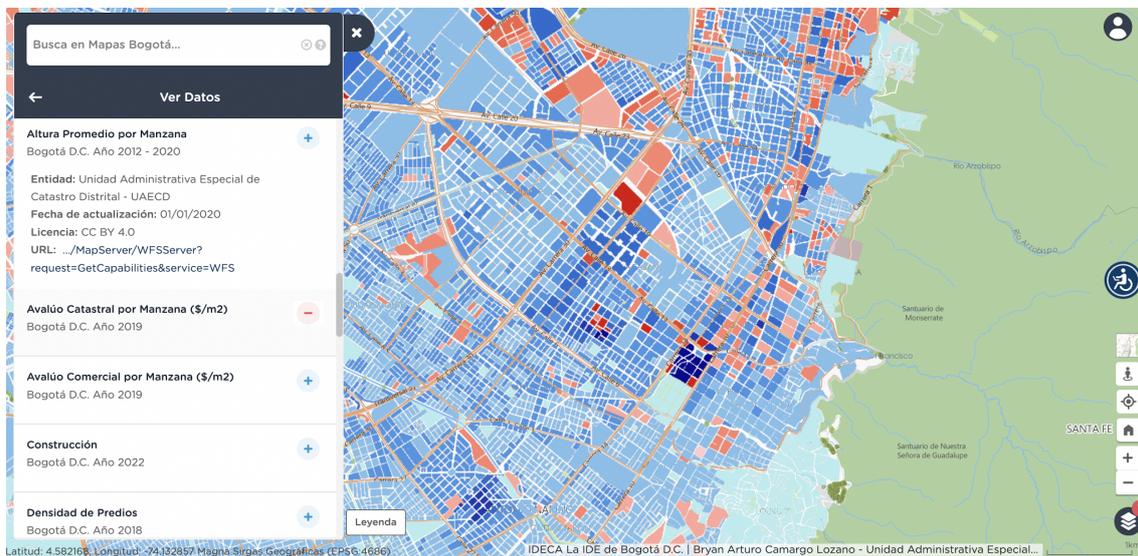


Figura 4.3.: Mapas en Línea de Bogotá

4.1.3. Compañías de servicios

Una compañía de servicios recibe centenares de llamadas de mantenimiento al día. De forma que necesita guardar informes de todas las actividades, mantener información pre-

cisa sobre dónde está qué, mantener los datos actualizados, asignar las tareas diarias, proveer información a terceros, etc. Esto es, compañías de gas, teléfono, electricidad, agua y televisión por cable. 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.

4.1.4. Transporte y Movilidad

Un departamento de transportes necesita almacenar información del volumen de vehículos, el estado del asfalto 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’. Un comercial necesita un sistema en el automóvil para localizar direcciones o rutas. Una compañía de envío de mercancías, como UPS, necesita tener información de los vehículos y los paquetes, donde se encuentran. Además, interesa planificar de forma eficiente las rutas de reparto. Un operador de autobuses escolares requiere planificar de forma óptima las rutas de las paradas. La autoridad de tránsito necesita conocer el estado del tránsito en todo momento (Por ejemplo, Figura 4.4).

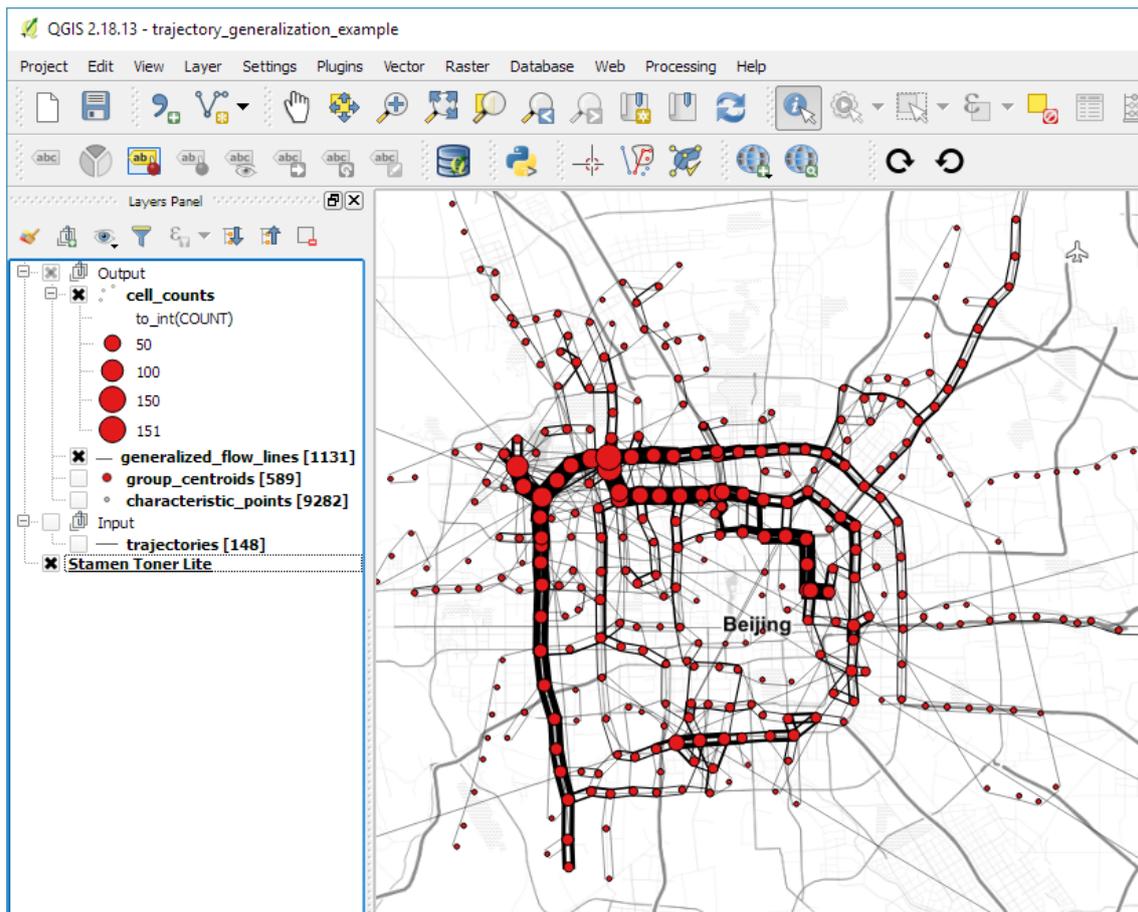


Figura 4.4.: Generalización de Trayectos desde datos de flujos de tránsito. Blog by Anita Graser.

Para más información puede explorar:

- [GIS Movement data blog by Anita Graser](#)
- [Mapnificent](#) muestra qué tan lejos puedes llegar usando transporte público, en un tiempo específico.
- [Flightradar24.com](#)
- [Marinetraffic.com](#)
- [GIS and Transport Modelling - “Strengthening the Spatial Perspective”](#)

4.1.5. Manejo de Recursos Naturales/SIG y Medio Ambiente

El uso económico de los recursos naturales está ligado inseparablemente con nuestra vida, sin embargo, para evitar o minimizar los efectos negativos tiene que llevarse a cabo de la mejor forma posible. La utilización cuidadosa y sustentable de los recursos geogénicos (por ejemplo, la minería, el agua) y de los recursos biogénicos (por ejemplo, agricultura y silvicultura, pesca) solo puede efectuarse bajo consideración extensa de una multitud de otras condiciones “espaciales” de marco, por lo tanto, los SIG ya hace mucho pertenecen a los instrumentos de gestión indispensables de la economía orientada a los recursos (Ejm. Atlas ambiental del Ecuador, Figura 4.5).

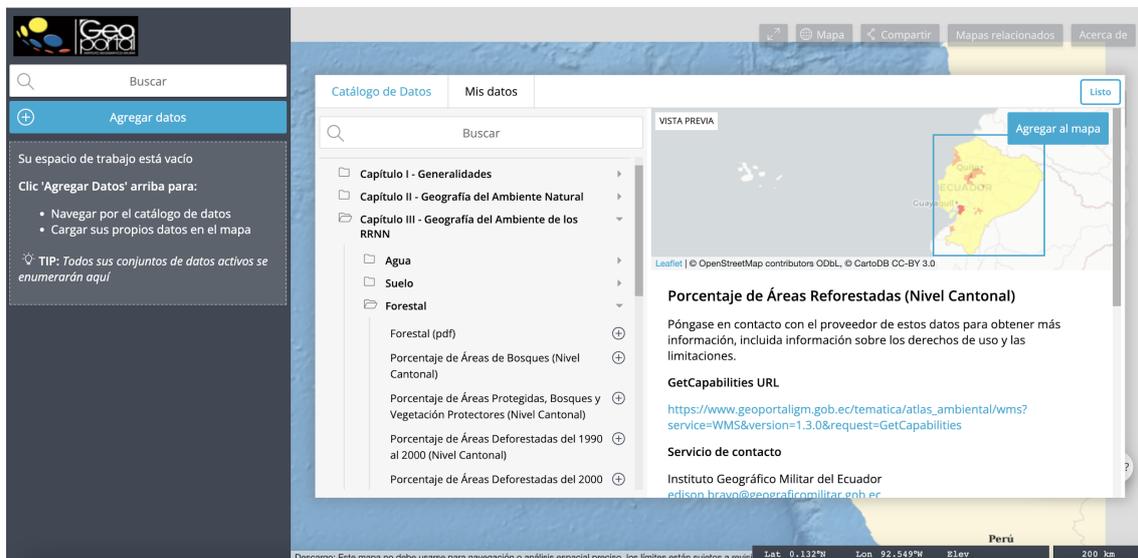


Figura 4.5.: Atlas Ambiental del Ecuador. [Acceder al visualizador](#)

Más que todo en las minas grandes a cielo abierto, y preliminarmente en la silvicultura, la aplicación de los SIG es particularmente bien desarrollada. Esto vale tanto para el área de la documentación (cartografía y sistema de informes), como también para aplicaciones de análisis y de modelación optimizada. Un número creciente de las empresas forestales son capaces de realizar la gestión de la tierra con la ayuda de SIG para mejorar la gestión de las superficies. El gran número de usuarios orientados en la práctica también es aparente por publicaciones y conferencias especializadas y un segmento diferenciado de oferentes.

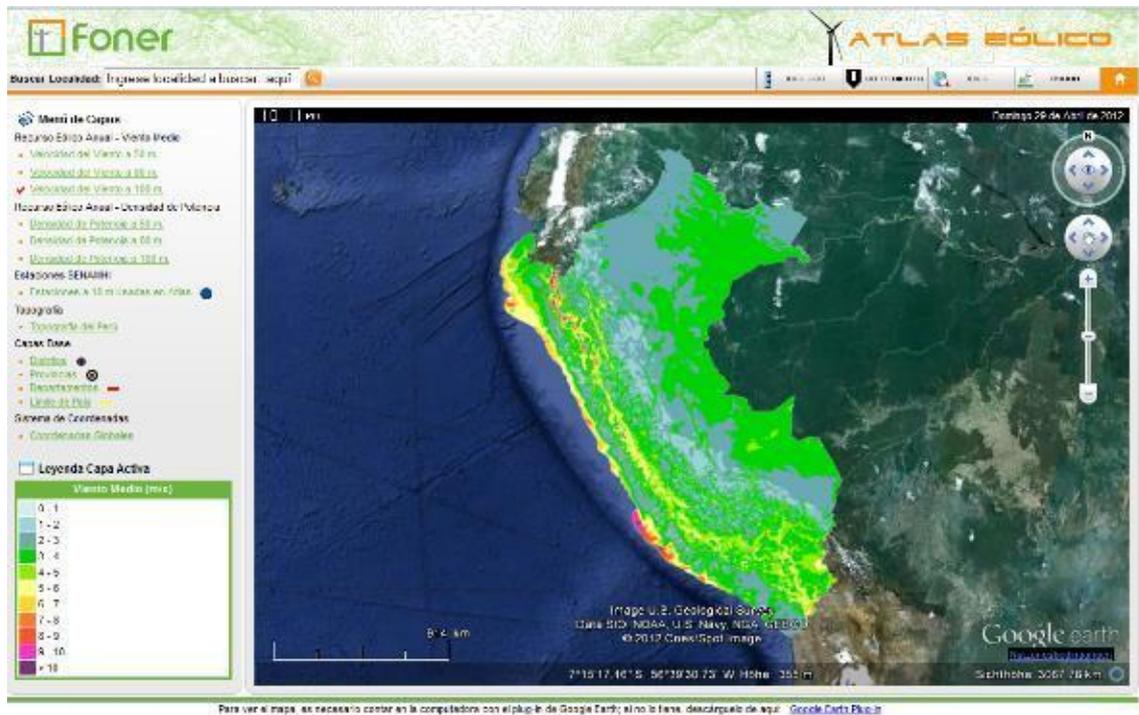


Figura 4.6.: Atlas Eólico de Perú [Acceder al documento](#)

4.1.6. Silvicultura

Una empresa forestal, dentro de su superficie gestionada trabaja con superficies parciales exactamente medidas, que, como componente elemental, en la mayoría de los casos presentan una edad ampliamente homogénea, una composición de especies de árboles definida, etc. Cada una de estas poblaciones de árboles está marcada por características periódicamente registradas acerca de la altura de la población, el rendimiento de crecimiento, el estado, la densidad, etc. Por lo tanto, el SIG de una empresta forestal consiste en una base de datos central, permanentemente actualizada de las superficies parciales, de informaciones colaterales acerca de terreno, suelos, etc., y de componentes funcionales con interés particular en modelos especializados y cartografía de alta calidad.

4.1.7. Manejo de Ecosistemas

El área extensa del **conocimiento de los ecosistemas**, de los espacios vitales como regiones funcionales, respetivamente homogéneas, es la base para el establecimiento de áreas de protección en base de valores de la sociedad. En esto, generalmente se difiere entre diferentes grados, respecto al nivel del procesamiento de datos: partiendo de la observación y del análisis del medio ambiente, es decir, el registro, la categorización y la agregación de los datos, en la mayoría de los casos se efectúa una evaluación respecto a ciertas exigencias de uso del ser humano. Las zonas evaluadas como “escasas”, “inestables” o “críticas en el manejo”, en consecuencia, sólo deben ser controladamente usadas o también ser apoyadas activamente en su función. Para esto es necesario el conocimiento de una gama particularmente amplia, de capas de geodatos, respectivamente “temas”, es decir categorías de información espacial, de lo cual resultan exigencias altas a una base de datos espaciales

flexible y también a una serie de herramientas multifuncional para el ecólogo. Por esto ya no asombra la difusión del uso de los SIG en las autoridades y en oferentes privados de servicios para finalidades ecológicas.

Los sistemas de información ambiental, por un lado, pueden ser aplicaciones especiales sectoriales de diferentes autoridades de administración y planificación, entonces hay que considerarlos bajo el punto de la planificación regional y nacional. Pero ellos no están ligados estrictamente a ciertos límites territoriales, también soluciones transfronterizas son pensables y parcialmente ya realizadas. En los sistemas de información ambiental, no solo hay que registrar datos “duros” (datos de medición), sino también peritajes, regulaciones jurídicas e información sobre la información ambiental (la llamada metainformación) y dónde ésta está evidente. Por lo tanto, están comprometidos con los objetivos de la protección entera de los ecosistemas y de los recursos. Los sistemas de información ambiental deben mejorar el estado del conocimiento sobre los problemas comunales y regionales del medio ambiente y la situación correspondiente de él, ellos deben posibilitar un urbanismo, respectivamente una ordenación espacial ecológicamente orientados, tanto como la regulación de intervenciones concretas en base de leyes.

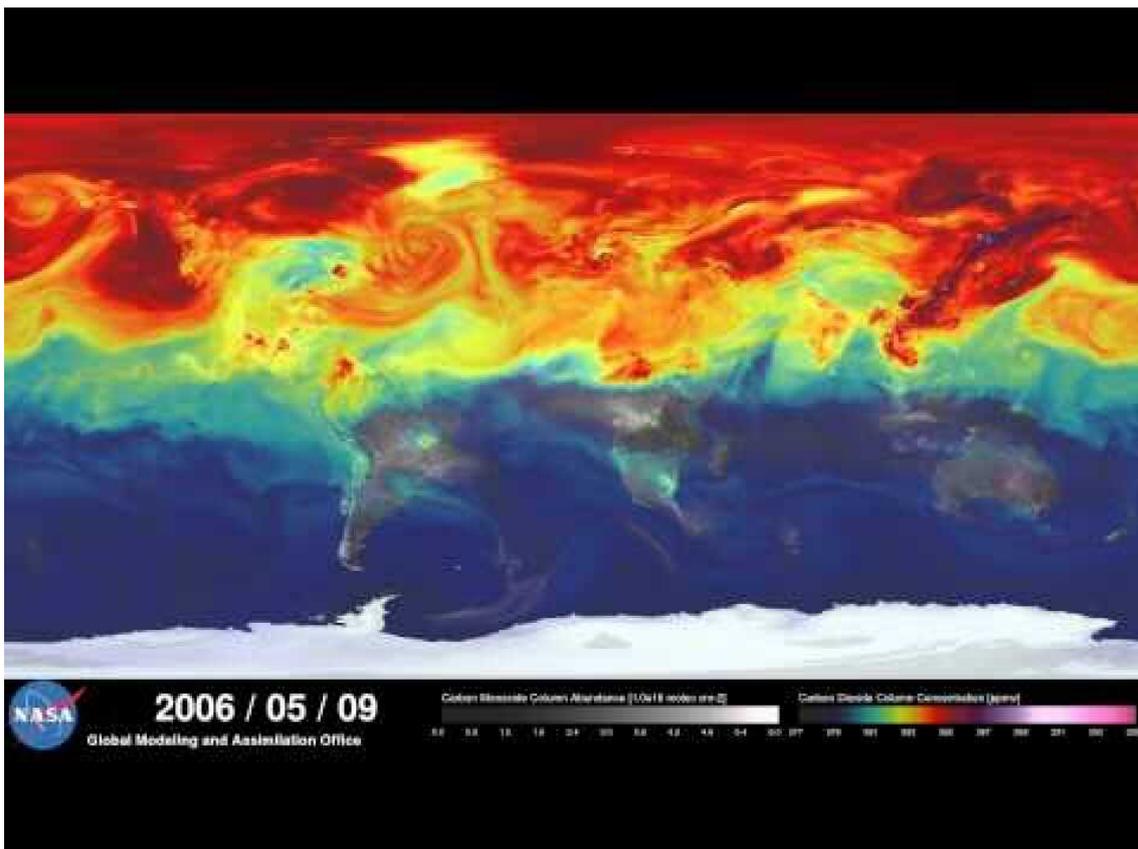


Figura 4.7.: VIDEO (3:10) Worldwide Co2 change over 1 year. Fuente: [NASA](#)

“Open Government Data (OGD) have become an indispensable backbone for nature conservation projects. Exemplary platforms for environmental data are the [London Datastore](#) and [Open Data Österreich](#) for Austria.”

4.1.8. Análisis de Hábitat de Especies Silvestres

Una aplicación de los SIG en la protección de la naturaleza y de los paisajes es la producción de modelos de nicho o aptitud especificada según especie. Los registros de especies suelen ser apenas muestras de un universo incontable, en tal sentido se hace necesario hacer uso de minería de datos, geoestadística, modelación probabilística y otros métodos, que permiten generar superficies de respuesta indicadores de los nichos o zonas de aptitud para las especies en estudio. Más que todo en América del Norte y en Gran Bretaña se ha establecido una disciplina de aplicación que mejor es representada por los términos ingleses *wildlife habitat analysis*, respectivamente *management*.

4.1.9. Agricultura

En agricultura se encuentra en aumento el uso de mapas detallados e imágenes para planear los cultivos, analizar los campos y planificar aplicaciones eficientes de fertilizantes y químicos. Estas técnicas son conocidas como ‘agricultura de precisión’, y permiten obtener beneficios en la calidad y cantidad de las producciones agrícolas. De otro lado, la identificación de zonas aptas para cultivos específicos se nutre de información complementaria como clima, suelos, infraestructura, aspectos sociales, etc., determinantes de la aptitud para un cultivo o cultivos en particular. El estudio del impacto de la agricultura sobre el territorio es hoy día uno de los temas candentes y de mayor atención, dado su significativo aporte al cambio climático global.

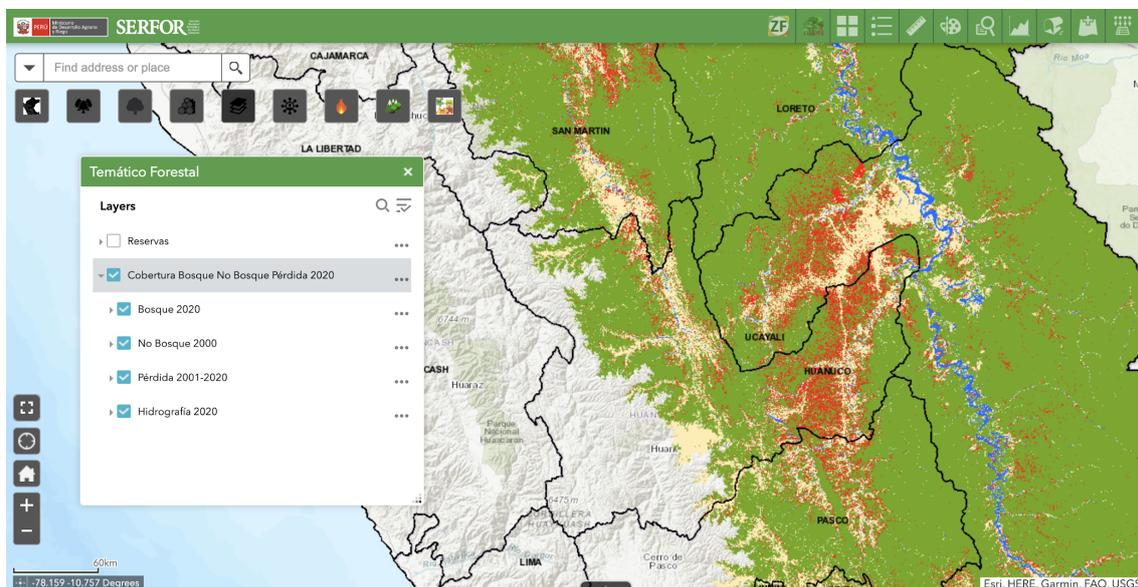


Figura 4.8.: Portal de monitoreo de cambios de la cobertura de bosque en Perú. Fuente: Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. [Acceder al portal](#)

4.1.10. Gestión y Mitigación de Riesgos Naturales

Aquí, el ser humano se encuentra en el centro: los efectos negativos, duraderos o espontáneos (“catástrofes”), del entorno técnico-económico respecto a su bienestar momentáneo

o a largo plazo. Por lo tanto, ya de antemano están definidas relaciones espaciales que se basan en distancias, velocidades, adyacencias y otros constructos espaciales.



Figura 4.9.: Iniciativa GMES de la Unión Europea para el monitoreo de desastres naturales

Un ejemplo de ello es el uso de herramientas como Google Earth en el transcurso del huracán Katrina. En la figura 10. podemos ver imágenes de Google Earth del antes y después del paso del huracán Katrina en Nueva Orleans. Durante las primeras semanas del huracán Katrina, Google Earth fue utilizado por la población local, para visualizar la situación de la ciudad. Posteriormente ha servido para compartir información de la clasificación de las zonas afectadas por el paso del huracán. Con tales temas explosivos, en los que la actuación o la falta de actuación provocan consecuencias amplias, que eventualmente también deciden sobre la supervivencia de personas, hay que determinar de antemano la actualidad, exactitud, responsabilidad, las consecuencias jurídicas, etc. de los datos.

4.1.11. Salud Pública

¿Cómo es que la geo información apoya nuestros servicios de salud? Con el término “HealthGIS”, se determinan las aplicaciones de SIG y actividades de investigación que se encuentran en la interfaz entre la geografía y la medicina. En esto se puede tratar, de la descripción y explicación de variaciones de enfermedades relacionadas al espacio, o de la planificación de instituciones de salud. En la ecología de enfermedades, que también es determinada como epidemiología geográfica, los SIG se usan para la identificación de posibles problemas de salud, para la comprobación de patrones espaciales significativos de casos de enfermedades y para el análisis geográfico-ecológico, en el que se conectan espacialmente datos de salud y factores de riesgo del entorno físico, químico, biológico o social.

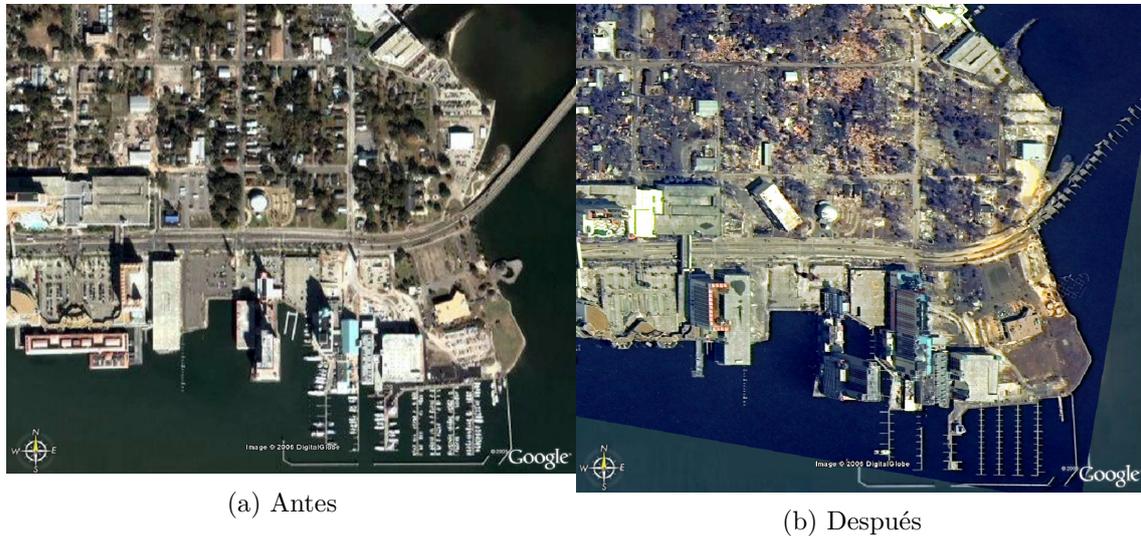


Figura 4.10.: Imágenes del antes y después del paso del huracán Katrina en Nueva Orleans. (Fuente: Google Earth)



Figura 4.11.: Explorador de casos de COVID-19 y medidas de salud pública aplicadas por regiones. Fuente: Global Humanitarian Operations, [Acceder al portal](#)

Además de los ejemplos dados atrás, son de interés particular del sector empresarial, privado y el público en general aplicaciones de SIG como las de los siguientes apartados.

4.1.12. Geomarketing

El término “Business Geographics” se encuentra en relación con aplicaciones de SIG con términos como, por ejemplo: Marketing y estudios de mercado (Geomarketing), búsqueda y análisis de localizaciones, análisis de áreas de influencia/venta, Marketing directo, evaluación de distribución, planificación y análisis de zonas, análisis de estructura de mercado, análisis de potencial y planificación de medios. En su centro se hallan planteamientos respecto a la combinación “correcta” de localizaciones de oferta de servicios y de competencia y la localización de (las viviendas de) los clientes, o la información “¿dónde se encuentran los clientes más probables para mi oferta?”.



Figura 4.12.: Geomarketing y sus campos de aplicación. Fuente: Cognatis Geomarketing & Big Data [Visitar el sitio](#)

4.1.13. SIG para Comunas

Las administraciones centrales o locales son las organizaciones que más utilizan los SIG, por ello más del 70% de las tareas en la administración están geográficamente relacionadas. En la actualidad, 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, salud pública, etc. Los municipios como autoridades locales del nivel más bajo se hallan en contacto directo con la vida y la economía, son el entorno local concreto para vivienda, empresa y espacio vital. De ello resulta una plenitud de tareas espaciales preliminarmente ligadas a la posición, que a causa de la intensidad de uso cada vez más intensa y por lo tanto la competencia crecida del uso del espacio y la cantidad de tareas administrativas en crecimiento permanente, ya no es superable sin apoyo informático.

4.2. Resolviendo problemas

Los SIG han sido siempre tecnologías enfocadas a la resolución de problemas. La experiencia acumulada en el desarrollo de aplicaciones ha permitido la creación de convenciones particulares para la representación, visualización y el análisis de datos para clases particulares de aplicaciones. A lo largo del tiempo estas convenciones han sido útiles en áreas bastante distintas de las originales y los distribuidores de software han desarrollado rutinas generales, que deben ser adaptadas por los usuarios según sus especificidades.

Los SIG permiten dar solución al viejo problema de combinar información **científica general** con **información específica**, añadiéndoles valor práctico.

Las características principales de los problemas espaciales incluyen:

- Existe gran número de alternativas para decidir.
- Las consecuencias de las alternativas de la decisión son variables espaciales.
- Cada alternativa es evaluada basándose en criterios múltiples.
- Algunos de los criterios pueden ser cualitativos y otros cuantitativos.
- Normalmente existe más de un gestor, hay un grupo de expertos implicados en el proceso de decisión.
- Los responsables de las decisiones tienen diferentes intereses en relación con la importancia de los criterios de evaluación y las consecuencias de la decisión.
- Las decisiones suelen estar limitadas por la incertidumbre.

4.3. El proceso de toma de decisiones

En 1960, Herbert Simon sugirió que cualquier proceso de toma de decisiones puede ser estructurado en tres fases principales:

1. Inteligencia - ¿Hay algún problema u oportunidad para cambiar?
2. Diseño - ¿Cuáles son las alternativas de decisión?
3. Elección - ¿Qué alternativa es la mejor?

¿Cómo y hasta dónde puede un SIG proveer la ayuda requerida en cada una de las tres fases del proceso de toma de decisiones?



Figura 4.13.: Fases del proceso de toma de decisiones

1. La **fase de inteligencia** incluye la búsqueda o *scanning* del medio, que requiere un análisis exploratorio de la situación. Los SIG pueden tener un papel vital en los estadios iniciales de la toma de decisiones espaciales. El sistema puede ayudar en la coordinación del análisis de la situación a *decidir*, a través de su habilidad de integrar y explorar los datos y la información desde un amplio rango de fuentes. Los SIG pueden presentar de forma eficiente y comprensiva la información para los encargados de las decisiones.

2. La **fase de diseño** implica el inventariado, desarrollo y análisis de un conjunto de alternativas posibles para un problema identificado en la fase de inteligencia. Generalmente se utiliza un modelo formal para ayudar a la generación de alternativas. Mientras un número en aumento de SIG son descritos como sistemas para apoyar el proceso de diseño y evaluación de las alternativas espaciales, los SIG disponibles más comerciales carecen del análisis espacial y modelado que requieren los técnicos. Las capacidades de los SIG para generar un conjunto de alternativas suelen estar basadas en los principios de las relaciones espaciales de conectividad, contigüidad, proximidad y los métodos de superposición. En los contextos SIG actuales los modelos para la generación de alternativas funcionan, en el fondo, ajenos a los conocimientos y comprensión de los usuarios.
3. La **fase de elección** supone la selección de una alternativa en particular de las que están disponibles. Cada alternativa es evaluada y analizada en relación con las otras en base a las normas preestablecidas. Las normas de decisión se utilizan para clasificar las alternativas bajo consideración. Esto es un punto crítico en la utilización de los SIG para el soporte en la toma de decisiones, ya que la clasificación depende de las preferencias de los expertos en relación con la importancia de los criterios de evaluación. En general los SIG no proveen los mecanismos para una incorporación flexible de las preferencias de estos expertos en los procesos de decisión.

En conclusión, los SIG han limitado sus capacidades de soporte en las fases de diseño y elección en el proceso de toma de decisiones. Los sistemas proveen ambientes de modelado muy estáticos, cosa que reduce el potencial de las herramientas de soporte de decisiones – especialmente en el contexto de problemas que implican decisiones en colaboración.

4.4. Los sistemas de soporte a la toma de decisiones espaciales

(SSDE)

Un sistema de soporte a la toma de decisiones (SSD) es un sistema interactivo informatizado diseñado para dar soporte a un usuario o grupo de usuarios para conseguir una elevada efectividad en la toma de decisiones frente la resolución de problemas espaciales que pueden ser programados. El proceso de toma de decisión frente a un problema viene acompañado hoy en día con Dashboards en función de datos espaciales como se indica en la Figura 4.14.

Las decisiones estructuradas ocurren cuando el problema puede ser estructurado o bien por el responsable de la decisión o en las bases de teorías de referencia. Las decisiones estructuradas pueden ser programadas, por lo que pueden resolverse mediante computadoras. Las decisiones no estructuradas ocurren cuando el responsable de las decisiones no es capaz de estructurar el problema y tampoco se halla solución en las bases de teorías ya establecidas. Estas decisiones no son programables y tienen que ser resueltas por el responsable de la decisión sin ayuda de la informática. La mayoría de los problemas espaciales del mundo real, si no todos, pueden clasificarse en algún punto entre estos dos casos extremos, de decisiones completamente estructuradas o no.

Esta es el área donde el concepto de los SSDE tiene mayor aplicación. La parte estructurada (o programada) del problema debe poder dar soluciones automáticas mientras que los



Figura 4.14.: GIS Dashboard para la Investigación de Crímenes, Fuente: Eagle GIS

aspectos no estructurados (o no programados) son escogidos por el usuario según sus criterios. El objetivo del sistema es mejorar la efectividad en los procesos de toma de decisiones. La máxima efectividad se consigue incorporando los juicios de la toma de decisiones en el proceso. Para ser efectivo el sistema debe ser sencillo de usar. El sistema ayuda a los usuarios a explorar el problema de forma interactiva en todas las fases del proceso de toma de decisiones.

Lección III.

Datum Geodésicos y Sistemas de Coordenadas

Presentación de la Lección 3

Objetivos de la lección

Al completar esta lección se espera que usted pueda...

- Revisar las razones que motivan al ser humano a representar el mundo
- Abordar de manera sistemática la comprensión de los diferentes sistemas de coordenadas utilizados histórica y actualmente en los SIG.
- Conocer los diferentes modelos de representación del globo terráqueo.
- Comprender el concepto y utilidad del Datum.

Resumen de la lección

Esta lección, así como la siguiente sobre Proyecciones (Lección 6) y Sistemas de referencia espacial (?@sec-sistemasreferenciaespacial), se centran en la georreferenciación, el proceso de establecer la coincidencia exacta e inequívoca entre una ubicación en la superficie de la Tierra y su representación digital. Esta es una tarea compleja y si no eres un geodesta por formación, es probable que (como muchos compañeros estudiantes de UNIGIS antes) hayas experimentado desafíos con ella en el manejo diario de datos espaciales. Estas dos lecciones pretenden servir de marco para abordar adecuadamente la georreferenciación y los sistemas de referencia espacial.

El principal problema para representar la superficie de la Tierra en un mapa o una pantalla / proyección es el hecho de que la Tierra es un cuerpo tridimensional similar a una esfera. Esta lección describe los antecedentes geodésicos de los sistemas de referencia espacial basados en los diferentes modelos de la forma de la Tierra. Por favor, asigne tiempo suficiente para adquirir un conocimiento y una comprensión exhaustivos y profundos de los Sistemas de Referencia Espacial. El correcto manejo de transformaciones y proyecciones es absolutamente fundamental para cualquier manejo de datos espaciales y será una habilidad requerida en los módulos venideros.

5. Datum Geodésicos y Sistemas de Coordenadas

5.1. ¿Por qué representar el mundo?

Geodesia

La Geodesia es la ciencia cuyo objeto es la medición y descripción matemática del tamaño y forma de la Tierra teniendo en cuenta sus campos gravitatorios y la localización precisa de puntos en su superficie.

El origen de las representaciones geográficas es muy lejano, movido por las necesidades de comunicación de antiguas sociedades. Las primeras representaciones geográficas debieron ser hechas directamente sobre la tierra o en las paredes de las cuevas, antes que el lenguaje fuera lo bastante sofisticado como para indicar con eficacia la localización de un elemento en algún lugar. La aparición de la imprenta en el siglo XV marcó un punto de inflexión en la representación de la información, y sobre todo en su distribución. Por primera vez, gracias a la impresión en papel, podía imaginarse que toda la humanidad tenía acceso a la misma información. El papel demostraba ser muy efectivo; era altamente resistente, flexible, barato y fácil de transportar. Pero había una restricción: el formato impreso obligaba a que la representación fuera plana, en dos dimensiones. De allí que los mapas se convirtieron en el medio más utilizado para compartir información de las expediciones, los nuevos territorios descubiertos, o la administración de colonias. La creación de mapas, su propagación y el compartir información precisa es lo que diferencia este periodo de los previos en la historia de la humanidad (sin ignorar los efectos negativos que conllevaron).

La humanidad ha desarrollado un rango amplio de técnicas para referenciar los objetos en el contexto en que se encuentran. Cuando los referenciamos en relación con el globo terráqueo hacemos alusión al ejercicio de georreferenciación.

💡 ¡Para recordar!

La **georreferenciación** (*geolocalización o geocodificación*) es la asignación de la localización a porciones del territorio, y se caracteriza por ser única, persistente en el tiempo y asociada a una determinada resolución.

La georreferenciación nos permite manipular datos de diferente naturaleza en un mismo sistema, ponerlos en el mismo plano y poder analizarlos, porque se refieren a un mismo lugar. Un ejemplo de georreferenciación son los nombres de los lugares o topónimos. El hecho de dar nombres a los diferentes lugares es una de las formas más simples de localización. Los topónimos no suelen variar en largos periodos de tiempo, y son únicos en una región determinada, por ejemplo, en un municipio. Pero ¿Cuántos municipios tienen

una vía llamada Calle Mayor? ¿Cuál es el nombre de la montaña más alta del planeta? Mt. Everest según occidente, Sagarmatha según los nepalíes o Chomolungma según los tibetanos. Los topónimos tienen limitaciones debido a que dependen del contexto en que se encuentran, pueden perderse a lo largo del tiempo y su utilidad depende de la resolución. Por ejemplo, nadie sabrá localizarnos si decimos simplemente que nos encontramos en África.

A partir del siglo XIX se han venido utilizando las direcciones y códigos postales para concretar la posición en los procesos de envío. Las direcciones postales son únicas (en un país, ciudad, municipio, calle, número, bloque, puerta y piso), por lo que son ideales para definir espacios urbanizados, la localización y el reparto de correo, pero no para definir la posición de territorios o elementos naturales. El catastro, diseñado como un mapa de unidades de propiedad en un área de territorio con fines de recaudación de impuestos, utiliza la codificación de cada parcela y subparcela para su localización. Cada unidad del territorio tiene un código único, por lo que es un buen sistema de georreferenciación, pero éste con normalidad es utilizado solamente por las administraciones oficiales.

Actualmente existen dos sistemas de georreferenciación que se han venido consolidando hasta ser de uso generalizado:

- Sistema de coordenadas geográficas que utiliza la latitud y la longitud
- Sistema de coordenadas planas, o coordenadas cartesianas como modernamente ha venido evolucionando.

💡 ¡Para recordar!

El método de georreferenciación más preciso es el **sistema de coordenadas geográfica (SGC)**, que consiste en la definición de dos puntos, latitud y longitud, y está basado en el centro de masa rotacional de la Tierra.

Pero antes de entrar en detalles sobre estos y otros sistemas de coordenadas revisemos los conceptos asociados a la forma de la tierra.

5.2. La forma de la Tierra

Durante miles de años la humanidad ha imaginado que el mundo tenía diferentes formas. En la civilización griega se creía que la Tierra era como un disco plano rodeado por un río, el océano. Por razones filosóficas se empezó a pensar que la Tierra era una esfera perfecta. Pero fue Aristóteles quien, observando los eclipses de Luna, evidenció que la sombra de nuestro planeta era circular. *A pesar de ello*, en la Edad Media se empieza a cuestionar la forma esférica de la Tierra. Durante los siglos XVII y XVIII algunos científicos, entre ellos Isaac Newton, razonaron que la Tierra debía ser achatada en los polos, debido a las fuerzas rotacionales, y propusieron que el elipsoide modelaba mejor la Tierra. *Si pensamos en la Tierra como una esfera perfecta, las irregularidades que en ella pudieran aparecer (continentes, montañas, etc.) representarían de hecho irregularidades insignificantes respecto a la esfericidad de la Tierra considerando también su gran tamaño.*

Pero aun teniendo en cuenta que estas desviaciones pudieran ser relativamente pequeñas, son importantes en el proceso de elaboración y transferencia de los datos terrestres a

representaciones de estos que puedan hacerse en un mapa, por ejemplo, de superficie plana.

A este punto, es importante precisar sobre la forma de la tierra lo siguiente:

- La forma de esferoide irregular que considera las anomalías de la gravedad se denomina **geoide**.
- Para la elaboración de mapas, las observaciones realizadas sobre el geoide deberán transferirse a una superficie de referencia geométrica regular, denominada **elipsoide**, que incorpora el achatamiento y se aproxima muchísimo al geoide.
- Las relaciones geográficas tridimensionales del elipsoide deberán transformarse al plano bidimensional del mapa por medio de diversos procedimientos denominados **proyecciones cartográficas**. Estas serán abordadas en la parte final de esta lección.

5.2.1. Modelo de Tierra elipsoide

En aras de la simplicidad, hasta ahora hemos asumido que la Tierra es una esfera. Sin embargo, estrictamente hablando, es una esfera aplanada que se comprime en los polos. Debido a la fuerza centrífuga de su rotación, la Tierra sobresale hacia afuera en el ecuador. Esta distorsión es quizá pequeña, el eje en el plano ecuatorial es mayor que el eje polar sólo en aproximadamente 1/300.

Sin embargo, para una representación precisa, el modelo matemático de la Tierra es, por lo tanto, un **elipsoide** en lugar de una esfera. Como habrás adivinado, la forma de círculo aplanado de un “elipsoide” deriva su nombre de la elipse: la rotación de una elipse alrededor de uno de sus ejes principales (b) (ver Figura 5.1 por US Department of Commerce (2018)) conduce a la formación de un elipsoide.

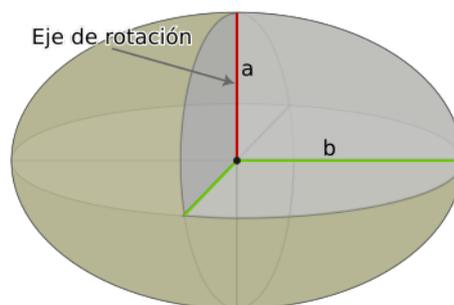


Figura 5.1.: Elipse

El radio más largo del elipsoide en el plano ecuatorial se conoce como a , mientras que el semieje menor más corto es el eje b . f significa el achatamiento de una elipse y se define como la relación de $(a - b)/a$.

Para comprender mejor cómo operan estos parámetros en la definición del elipsoide explore el [siguiente enlace](#) y modifique los valores allí.

5.2.2. Multitud de elipsoides

La evolución del modelo elipsoidal se remonta a la década de 1800. Los pioneros en geodesia han medido la Tierra con una precisión increíble dados los dispositivos disponibles en ese momento. Uno de los esfuerzos más extraordinarios fue el *Arco Geodésico de Struve*, un estudio de triangulación dirigido por Friedrich Georg Wilhelm von Struve. Con torres de madera e instrumentos ópticos para la triangulación, Struve y su equipo midieron la curvatura del arco de la Tierra en una red de triangulación desde Hammerfest en el norte de Noruega hasta el Mar Negro, más de 2820 km. Con la ayuda de esta primera medición precisa de un meridiano, Struve calculó el aplanamiento de la Tierra con un error menor del 1,2% (Viik 2006). Friedrich Bessel, basándose en sus propias medidas y otras nueve encuestas en diferentes partes del mundo, finalmente sugirió el elipsoide de Bessel de 1884 con un error tan pequeño como el 0,3%. Sólo la geodesia satelital moderna podría obtener mejores resultados.

En el siglo 19, muchos grandes matemáticos, astrónomos y geodestas trabajaron al servicio de las autoridades cartográficas nacionales para recalcular las dimensiones de la Tierra y adaptarla a las condiciones regionales. Por lo tanto, se ha propuesto una serie de elipsoides diferentes. Por ejemplo, en los países de habla alemana el elipsoide Bessel se introdujo en 1841, la antigua Unión Soviética se refirió al elipsoide Krasovsky, los Estados Unidos utilizaron el elipsoide Clarke desde 1878, y en la OTAN el elipsoide internacional de Hayford se utilizó como sistema de coordenadas de referencia hasta 1996.

Como estos elipsoides son la base de todos los mapas y sirven al propósito de la cartografía regional hasta hoy, las agencias nacionales de cartografía solo adoptan lentamente nuevos modelos globales medidos por satélite. En la aplicación interactiva de la Figura 5.2 a continuación, puede explorar las diferencias para algunos de los modelos elipsoidales comunes con más detalle:

Ellipsoid	<input type="text" value="Schweiz 1903"/>	
Semi-major axis (a)	<input type="text" value="6377397"/>	m
Semi-major axis (b)	<input type="text" value="6356078.962"/>	m
Flattening (f)	<input type="text" value="1:299.153"/>	
Eccentricity $e^2 = (a^2 - b^2) / a^2$	<input type="text" value="0.081697"/>	
Region	<input type="text" value="Switzerland"/>	

Figura 5.2.: Abra la versión web de este libro para interactuar con la aplicación

Coordenadas elipsoidales

A diferencia de las coordenadas esféricas, los ángulos latitudinales no pasan a través del centro de la Tierra en un elipsoide. Consideremos la ubicación de la ciudad de Salzburgo. En el elipsoide, la latitud de Salzburgo es el ángulo entre el ecuador y la línea que es normal al plano tangente de Salzburgo, ver Figura 5.3. La Figura 5.4 ilustra la interfase de ArcGis donde aparecen definidos los parámetros del elipsoide y la Tabla 5.1 los elipsoides más comunes utilizados a nivel global. Un documento en versión de trabajo en [este enlace](#), reporta la mayoría de los elipsoides y sus Datum para el mundo entero.

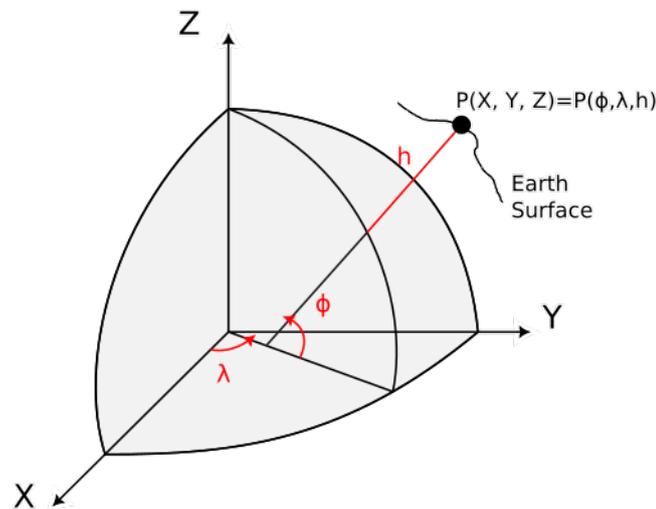


Figura 5.3.: Ángulos latitudinales para no pasar por el centro de la Tierra en un modelo elipsoidal. Fuente: US Department of Commerce (2018)

Las longitudes en contraste siempre pasan por el centro del elipsoide. Como son Grandes Círculos, las longitudes pasan por el centro al igual que en el modelo esférico.

Tabla 5.1.: Elipsoides de Referencia utilizados en diferentes regiones del mundo. Fuente: [Wikipédia, 2022](https://es.wikipedia.org/wiki/Elipsoide)

Elipsoide de Referencia	Radio Ecuatorial (m)	Radio Polar (m)	Achatamiento inverso	Dónde es utilizado
Esferoide de Everest	6377301.243	6356100.228	300.801695	
Maupertuis (1738)	6397300	6363806.283	191	Francia
Everest (1830)	6377276.345	6356075.413	300.801698	India
Airy (1830)	6377563.396	6356256.909	299.3249646	Gran Bretaña
Bessel (1841)	6377397.155	6356078.963	299.1528128	Europa, Japón
Clarke (1866)	6378206.4	6356583.8	294.9786982	América del Norte
Clarke (1880)	6378249.145	6356514.87	293.465	Francia, África
Helmert (1906)	6378200	6356818.17	298.3	
Hayford (1910)	6378388	6356911.946	297	Estados Unidos
Internacional (1924)	6378388	6356911.946	297	Europa
NAD 27	6378206.4	6356583.8	294.9786982	América del Norte
Krassovsky (1940)	6378245	6356863.019	298.3	Rusia
WGS66 (1966)	6378145	6356759.769	298.25	EUA/DoD

Elipsoide de Referencia	Radio Ecuatorial (m)	Radio Polar (m)	Achatamiento inverso	Dónde es utilizado
Australian National (1966)	6378160	6356774.719	298.25	Australia
Novo Internacional (1967)	6378157.5	6356772.2	298.2496154	
GRS-67 (1967)	6378160	6356774.516	298.2471674	
SAD-69 (1969)	6378160	6356774.719	298.25	América del Sur
WGS-72 (1972) Datum	6378135	6356750.52	298.26	EUA/DoD
73 Hayford-Gauss IGP	6378388		297	Portugal
GRS-80 (1979)	6378137	6356752.314	298.2572221	América Latina
NAD 83	6378137	6356752.3	298.2570249	América del Norte
WGS-84 (1984)	6378137	6356752.314	298.2572236	
IERS (1989)	6378136	6356751.302	298.257	

5.2.3. Modelo de la Tierra Geoide

Mientras que los modelos **esféricos** y **elipsoidales** establecen los bloques de construcción básicos para representar la Tierra en una superficie plana, la complicación surge tan pronto se tiene en cuenta la **tercera dimensión**.

La Tierra es un cuerpo complicado con su topografía y su espesor de corteza distribuido de manera desigual y la densidad de su forma no tan suave. Las montañas, las tierras bajas y las costas oceánicas causan anomalías **en el campo gravitatorio de la Tierra**, lo que a su vez tiene un impacto en el nivel del mar. La Figura 5.5 muestra la forma resultante de la Tierra, que puede describirse mejor como **“similar a la papa”**. Este modelo gravitacional de la Tierra se llama **“Geoide”**. En contraste con las formas matemáticamente descritas de esferas y elipsoides, un Geoide es un modelo físico de la Tierra.

El nivel medio del mar sigue puntos de igual gravedad, y como tal, la superficie del mar se utiliza como referencia natural para las mediciones de elevación (Kimerling et al. 2016). Se representa físicamente a través de medidores a lo largo de las orillas del mar, por ejemplo, el mareógrafo Normal Amsterdam Peil o la estación de medición en Trieste. Lea más al respecto en este [artículo](#).

5.3. Datum geodésico

Además de elegir un elipsoide bien ajustado, los geodestas necesitaban cambiar y rotar ligeramente los elipsoides para que coincidieran con el modelo matemático del geoide en forma de papa del mundo real. Por lo tanto, las agencias nacionales de mapeo no solo definieron el elipsoide en sí, sino también parámetros que describen la ubicación, escala

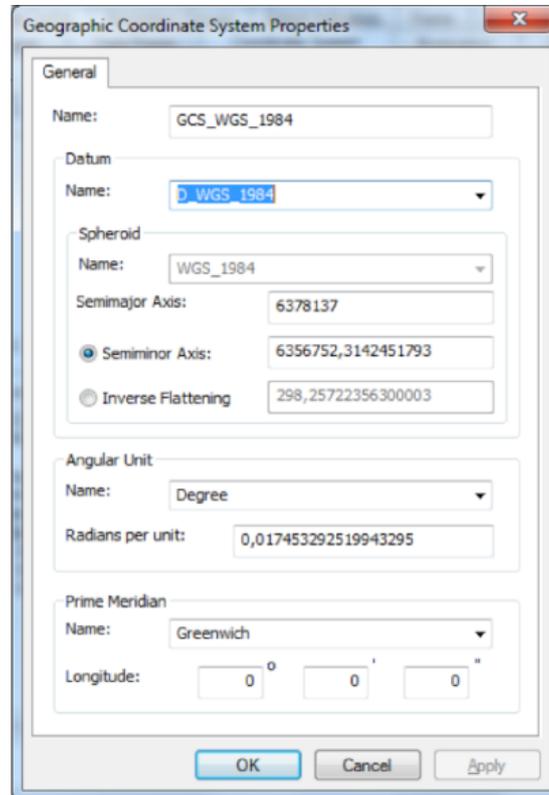


Figura 5.4.: Vista de los parámetros del elipsoide en ArcGis, Esri.

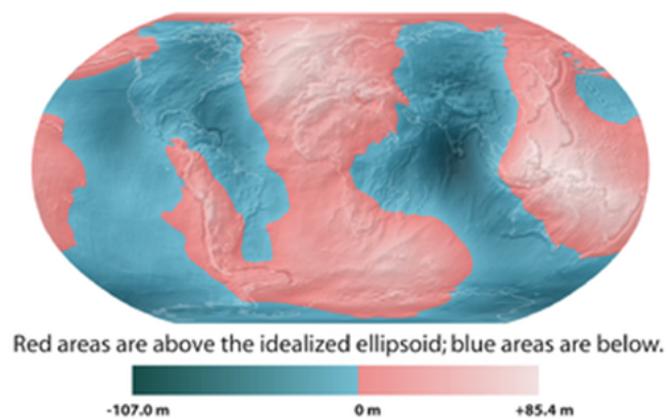


Figura 5.5.: Desviación del Geoide de la forma idealizada de la Tierra.

y orientación específicas del elipsoide en relación con la superficie del modelo de nuestra Tierra.

Además, el elipsoide era necesario tener un punto de referencia físico, un **Kilómetro Cero**, para anclar el modelo a la Tierra. La Figura 5.6 muestra un ejemplo especialmente hermoso para un Kilómetro cero: el diamante de Cuba de 25 quilates, que ha sido incrustado en el piso de la sala principal del edificio del Capitolio Nacional de La Habana. Hoy en día, solo hay una réplica, con el original almacenado por razones obvias.



Figura 5.6.: Kilómetro Cero de Cuba: el “diamante de El Capitolio”.

Para que un elipsoide sirva como referencia para la medición y la información de posición / ubicación, se desplaza y gira lo más cerca posible para adaptarse a la forma geoide local de la Tierra. Con la descripción de la “nueva” ubicación, escala y orientación en relación con la superficie del modelo de nuestra Tierra, sentamos las bases para la determinación exacta de las coordenadas. Este proceso se conoce como **datum geodésico**. “Un datum geodésico es la base para el cálculo de posiciones en la superficie de la tierra o alturas por encima o por debajo de ésta”.

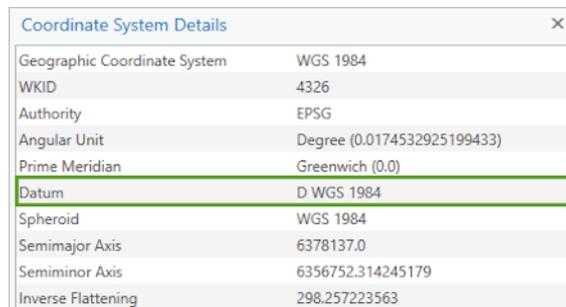
Mientras que el elipsoide se aproxima a la forma de la Tierra, el datum define la posición del esferoide relativa al centro de la Tierra. El datum provee la forma de referencia para las mediciones de localización en la superficie terrestre. Esto define el origen y la orientación de las líneas de latitud y longitud.

¿Qué exactamente es el Datum?

El **datum** se define como el punto tangente (coincidente) al elipsoide y al geoide. Cada datum estaría formado por:

- Un elipsoide de referencia
- El punto donde el elipsoide y la Tierra son tangentes

El Datum es una parte de los sistemas geográficos de coordenadas que determina el modelo utilizado para representar la superficie terrestre e indica dónde se ubica en relación con la superficie. Este incluye un esferoide, que se define por su semieje mayor, semieje menor y valores de aplanamiento inverso (Figura 5.7).



Coordinate System Details	
Geographic Coordinate System	WGS 1984
WKID	4326
Authority	EPSG
Angular Unit	Degree (0.0174532925199433)
Prime Meridian	Greenwich (0.0)
Datum	D WGS 1984
Spheroid	WGS 1984
Semimajor Axis	6378137.0
Semiminor Axis	6356752.314245179
Inverse Flattening	298.257223563

Figura 5.7.: Parámetros del Datum en interfaz de aplicativo de SIG.

Un **datum geodésico** define todos los parámetros necesarios para definir el modelo de referencia geodésico con fines cartográficos:

- El elipsoide (semieje menor, semieje mayor)
- Su orientación y rotación,
- El Kilómetro Cero (y un conjunto de otros puntos de referencia físicos)

La especificación de un datum geodésico es la base del sistema de coordenadas utilizado. Por lo tanto, **es esencial registrar el datum geodésico en la documentación de metadatos** para cualquier conjunto de datos de coordenadas geográficas.

Un datum es entonces cualquier cantidad numérica o geométrica o conjunto de tales cantidades que pueden servir como referencia o base para otras cantidades. Hay dos tipos de datos generalmente considerado por los topógrafos: Vertical y horizontal. Cuando el término datum se usa solo, por lo general se refiere a un datum horizontal. Los datum verticales y horizontales generalmente se definen por separado. Un **datum horizontal** es un elipsoide que se utiliza como superficie modelo para describir la posición horizontal de los puntos con coordenadas geográficas. Un **datum vertical** se utiliza como línea de base para las mediciones de altura / elevación en un geoide (Kimerling et al. 2016).

Dependiendo del cubrimiento espacial de un datum, existen dos tipos: **locales y geocéntricos**. A continuación, abordaremos cada uno de estos.

5.3.1. Datum locales

El datum local (o regional), alinea el elipsoide de la superficie terrestre a partir de la posición de un punto concreto de la Tierra. Un punto en la superficie del elipsoide es asociado a una posición particular en la superficie terrestre. Este punto es conocido como el origen del datum. Las coordenadas del punto de origen son fijas, y el resto de los puntos son calculados a partir de esta. Pues, el origen del sistema de coordenadas de un datum local no es el centro de la Tierra, sino un punto que se encuentra desplazado. Es decir, los elipsoides de referencia locales no son geocéntricos, tienen un desplazamiento en la dirección X, Y y Z con respecto al centro de masa de la Tierra, y giran alrededor de los ejes X, Y y Z.

Es así como el datum local está anclado en uno o más puntos centrales de la Tierra para adaptarse mejor a la forma y al tamaño de solo una cierta parte de la superficie del geoide a la parte respectiva de la superficie de la Tierra (por ejemplo, para América del Norte - NAD 1927, para Europa - Datum Europeo de 1950). El Datum local se genera por la intersección de superficie del elipsoide y del geoide, de donde se calcula el elipsoide local (Figura 5.8).

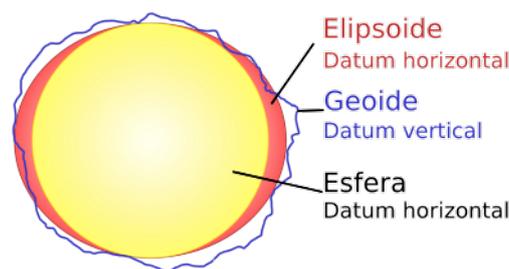


Figura 5.8.: Modelos que representan la Tierra en formas crecientes de abstracción: esfera, elipsoide y geoide

A continuación, se presentan algunos de los datum locales o regionales que más se han venido utilizando, así como el elipsoide que se ha tomado como referencia (Tabla 5.2).

Tabla 5.2.: Algunos de los datum más utilizados y el elipsoide que se toma de referencia.
Fuente: Salazar (s. f.)

Datum	Elipsoide de referencia
Australian Geodetic 1984	Australian National
El Cabo - Suráfrica	Clarke 1880
Cabo Cañaveral, Florida	Clarke 1866
Europeo 1950 - España, Portugal	International 1924
Europeo 1950 - Tunez	International 1924
Indio - India, Nepal	Everest 1956
Norte América 1927 - Centro América	Clarke 1866
Norte América 1927 - Este del Mississippi	Clarke 1866
Norte América 1927 - Méjico	Clarke 1866
Norte América 1927 - Oeste del Mississippi	Clarke 1866
Norte América 1983 - Centro América, Méjico	GRS 1980

Datum	Elipsoide de referencia
Pico de las Nieves - Islas Canarias	International 1924
SGS 85 - Soviet Geodetic System 1985	S85
SudAmérica 1969 - Argentina	South American 1969
SudAmérica 1969 - Brasil	South American 1969
SudAmérica 1969 - Venezuela	South American 1969
Tokio - Japón	Bessel 1841
Definición Global WGS 1984	WGS 84

Es importante tener presente, que siempre que cambiemos de datum, o más concretamente, de sistema de georreferenciación, los valores de coordenadas de nuestros datos van a modificarse.

5.3.2. GRS80 y el Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas (SIRGAS)

El Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) ha sido extendido (densificado) en el continente americano mediante SIRGAS ([Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas](#)). Está conformado por una red con más de 180 estaciones geodésicas de alta precisión (algunas de ellas de funcionamiento continuo), cuya distribución ofrece un cubrimiento homogéneo sobre el continente y, por lo tanto, las condiciones necesarias para que las redes nacionales estén vinculadas a dicho marco. El datum geodésico correspondiente está definido a partir de los parámetros del elipsoide GRS80 (Geodetic Reference System, 1980), orientado según los ejes coordenados del sistema de referencia SIRGAS, equivalente al ITRF94 (Sánchez Rodríguez 2004). Información sobre los sistemas nacionales está disponible en el siguiente [enlace](#).

A continuación, se presentan ejemplos de algunos países de la región:

- **Colombia -. Marco Geocéntrico Nacional de Referencia (MAGNA).** En Colombia, el IGAC, organismo nacional encargado de determinar, establecer, mantener y proporcionar los sistemas oficiales de referencia geodésico, gravimétrico y magnético (Decretos No. 2113/1992 y 208/2004) inició a partir de las estaciones SIRGAS la determinación de la Red Básica GPS, denominada MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia) que, por estar referida a SIRGAS se denomina convencionalmente MAGNA-SIRGAS. El datum geodésico asociado corresponde con el elipsoide GRS80 (Geodetic Reference System, 1980) (Sánchez Rodríguez 2004) y los parámetros de transformación del anterior Datum Bogotá se presentan en la Tabla 5.3. Si desea explorar los sistemas de coordenadas utilizadas en Colombia y sus más reciente cambios visite [este sitio](#).
- **SIRGAS Ecuador.** En el año de 2019, [Ecuador adopta SIRGAS](#) en reemplazo del sistema de referencia local PSAD56. Para transformar coordenadas de tal sistema al nuevo se definieron los parámetros de la Tabla 5.3. Con estos el mejor ajuste a nivel nacional es de 2 metros.

Tabla 5.3.: Parámetros de los Datum de Colombia y Ecuador.

Parámetro	Colombia	Ecuador
datum	D-MAGNA	Ecuador
elipsoide de referencia	GRS_1980	WGS84
Diff x	-577 m	-60.31
Diff y	-90 m	245.935
Diff z	-463 m	31.008
Rotación del eje X	5.137"	-12.324
Rotación del eje y	1.474"	-3.755
Rotación del eje z	5.297"	7.370"
factor de escala del eje	0.9992	0.447

No todos los países latinoamericanos se han integrado a la red SIRGAS, algunos están en proceso de creación de marcos nacionales. Sin embargo, cada país tiene definidos el o los parámetros de sus sistemas nacionales los cuales son permanentemente incorporados en los SIG. Una base de datos con aplicativo para realizar todo tipo de conversiones y transformaciones la ofrece [PROJ](#).

De otro lado, [EPSG.io](#) simplifica el descubrimiento de sistemas de referencia de coordenadas utilizados en todo el mundo para crear mapas y datos geográficos y para identificar la posición geográfica. Es una herramienta práctica para cualquier persona interesada en la cartografía y la elaboración de mapas digitales, que necesite conocer los valores exactos de latitud y longitud de las coordenadas numéricas en diferentes sistemas de referencia espacial. La aplicación de mapas incluida permite mostrar la ubicación precisa en cualquier parte del planeta también visualmente.

5.3.3. Datum geocéntrico

El datum geocéntrico es un modelo que permite una mejor alineación con el elipsoide de referencia de toda la superficie de la Tierra (por ejemplo, WGS 84. Los datum geocéntricos más recientes a nivel mundial se calcularon sobre la base de mediciones satelitales de alta precisión. En los datum de referencia globales, el centro del elipsoide es también el centro de la masa de la Tierra. A diferencia de un datum local, el datum geocéntrico está diseñado de manera que el acuerdo del geoide esté alineado de manera más uniforme sobre la Tierra. Esto hace que los datum geocéntricos sean capaces de funcionar bien en aplicaciones globales como el GPS.

Los datum geocéntricos válidos a nivel mundial más recientes se calcularon sobre la base de mediciones satelitales de alta precisión. A diferencia de un datum local, el datum geocéntrico está diseñado para que la concordancia del geoide esté alineada más uniformemente sobre la Tierra. Otra diferencia en comparación con el datum local es que el centro del Elipsoide / Esferoide es también el centro de la (masa de la) Tierra (por lo tanto, geocéntrico). Esto hace que el datum geocéntrico sea capaz de funcionar bien en aplicaciones globales como GPS.

Si ahora está confundido por “esferoide”, “datum”, “geográfico” o “proyectado”, puede encontrar útil esta [entrada de blog de ArcGIS](#) .

El Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS84) es actualmente el datum geocéntrico más utilizado, pero también desempeña un papel cada vez más importante a nivel nacional. Por lo tanto, no se necesitan parámetros de ubicación siempre que exista una definición del elipsoide exacto (Tabla 5.4):

Tabla 5.4.: Parámetros del Elipsoide WGS84

Parámetro	Valor
semieje mayor	6378137
semieje menor	6356752
Aplanamiento	1 / 298.257223563

WGS84 fue diseñado principalmente para aplicaciones globales como mediciones GPS. Es prácticamente idéntico al ETRS89 (Sistema Europeo de Referencia Terrestre). También sirve como estándar nacional para nuevas mediciones de elevación en Colombia y Ecuador con los sistemas de referencia existentes y más antiguos (tanto nacionales como regionales). Recuerde que información sobre los sistemas de otros países de la región están disponibles en la página 46 de este [enlace](#).

El Sistema Europeo de Referencia Terrestre (o: Marco) 1989 (**ETRS89 / ETRF89**) es el sistema europeo de puntos de estudio. A diferencia de los geoides locales con un solo punto de control, tiene alrededor de 90 puntos de estudio medidos con alta precisión repartidos por todo el continente europeo, que a nivel nacional se utilizan para estudios geodésicos tradicionales más detallados.

ETRS89 está vinculado al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), que requiere ajustes anuales de sus puntos de referencia. Para las aplicaciones SIG comunes, el ITRF no desempeña ningún papel y, por lo tanto, no se discutirá más a fondo. Para los usuarios de SIG, es importante saber ante todo que ETRS89 y WGS84 son idénticos dentro de los estándares comunes de SIG, por lo que no se requiere ninguna transformación de referencia entre estos sistemas.

5.4. Sistemas de referencia de altura

Un datum vertical es una superficie o un nivel arbitrario para aquellas elevaciones a las cuales hace referencia. Por lo general, el geoide es esa superficie. Sin embargo, otros datum verticales pueden tener como referente la altura sobre el nivel medio del mar, nivel en el cual la presión atmosférica es de 29,92 pulgadas de mercurio (1013,2 milibares de mercurio) o una cota inicial arbitraria. Los puntos de referencia verticales suelen definirse como una superficie de elevación “0” y también se les llama datos de altitud. Dado que es imposible determinar exactamente dónde el geoide interseca una masa de tierra, es imposible utilizar el geoide como el datum vertical real. Históricamente, las mareas se promediaron durante 19 años para establecer un nivel medio del mar, datos muy cerca del geoide, pero no exactamente coincidentes. Por esta razón las líneas de nivel de los mareógrafos en diferentes regiones no se conectan exactamente a la misma altura.

El componente vertical de la georreferenciación generalmente está relacionado con el geoide (es decir, la altura por encima del geoide). El geoide se define como el campo a gravedad

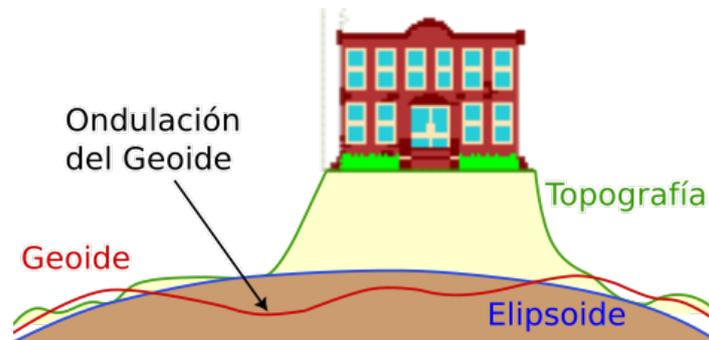


Figura 5.10.: Comparación de altura, elipsoide y geoide

desviaciones locales se conocen como **ondulaciones del geoide**. Por ejemplo, en Austria debido a la influencia de los Alpes, el geoide se encuentra de 43 a 52 metros por encima del elipsoide definido por el datum WGS84. Esta diferencia suele ser significativamente menor para los datum de referencia locales, que se ajustan localmente al geoide: en Austria, la desviación entre el geoide y el elipsoide según lo definido por el datum del Instituto Geográfico Militar Nacional (MGI) solo oscila entre 2,5 y 3,5 metros (Figura 5.11).

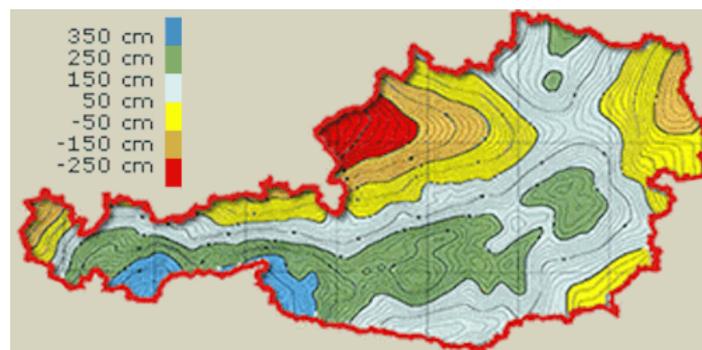


Figura 5.11.: Discrepancias de altura entre el Geoide y el elipsoide de Bessel (MGI) en Austria

Un receptor GPS convierte las alturas elipsoides en alturas del geoide interpolando un modelo geoide más o menos detallado (una tabla de búsqueda almacenada en el receptor) y aplicando la fórmula simple $h = H + N$. Sin embargo, se encontrarán imprecisiones en las mediciones de elevación de los dispositivos GPS (Kimerling et al. 2016).

Similares retos se presentan en las Américas para definir con precisión las alturas y los referentes más adecuados. Como se sabe, el Océano Pacífico tiene una diferencia de altura con respecto del Océano Atlántico de alrededor de 20 cms, siendo este último más bajo. Los errores actuales presentes en la estimación de la componente vertical oscilan entre 1 y 2 metros. Esta situación ha llevado a las naciones que poseen costas en los dos océanos, a realizar estudios conducentes a definir el marco de referencia vertical. Similar al caso presentado en Europa, ha sido necesario determinar las anomalías gravimétricas en numerosos sitios para producir un modelo geoidal como superficie vertical de referencia. Los datos obtenidos podrán relacionarse con las mediciones clásicas que dependen también de las alturas geométricas elipsoidales y las mediciones llevadas a cabo con métodos satelitales (por ejemplo, GPS). Ejemplo de estudios al respecto de la componente verti-

cal se presentan asociados a los enlaces de los siguientes países: [Colombia](#), [Venezuela](#), y [Ecuador](#).

5.5. Sistemas de Coordenadas

Un sistema de coordenadas es un conjunto de valores que permiten definir de forma inequívoca la posición de cualquier punto. El sistema toma como referencia un punto de origen (en base a un elipsoide de referencia o datum) y un conjunto de ejes perpendiculares que definen unas coordenadas cartesianas.

Existen diferentes sistemas de coordenadas, que permiten la representación de puntos en el espacio. La primera introducción a los sistemas de coordenadas fue descrita por René Descartes, en el siglo XVII, basándose en coordenadas ortogonales. Cualquier objeto es posible de **georreferenciar** en la superficie de la Tierra de diferentes maneras, por ejemplo, por la **dirección** de su apartamento, el kilómetro de la **calle** en una carretera, los valores de **longitud** y **latitud** (lon/lat) que se muestran en un GPS, o el **Este** y el **Norte** (x/y) de una cumbre en un mapa de senderismo. Para hacer esta coincidencia, es necesario indicar la información de georreferenciación junto con el sistema al que se refiere. Por ejemplo, para servir como una georreferencia inequívoca, la información “Avenida de las Américas con 26” necesita la referencia al sistema de calles de Bogotá, así como el valor “12.3km” necesita la referencia a la autopista Cali – Palmira en Valle del Cauca.

Lo mismo ocurre con las coordenadas geográficas (lon/lat) y las coordenadas proyectadas (x/y): no podemos conocer el sistema de coordenadas particular al que se refieren estas coordenadas.

Para recordar

Los sistemas de coordenadas son modelos que hacen referencia a una ubicación en el espacio (geográfico) con la ayuda de valores numéricos: las coordenadas.

La integración de datos espaciales de diferentes fuentes en una geodatabase requiere la especificación de un sistema de coordenadas como referencia espacial común para todos los objetos. Esto incluye la especificación de la proyección y el modelo geométrico respectivo de la Tierra, así como información sobre las unidades de medida y precisión.

Considere, por ejemplo, la ubicación de la estación base GPS en la Universidad de Salzburgo. Dependiendo del sistema de coordenadas, los valores de coordenadas pueden ser fundamentalmente diferentes (Tabla 5.5):

Tabla 5.5.: Descripción de la posición de la estación base GPS en la Universidad de Salzburgo en múltiples sistemas.

Datum geográficos	Sistema de proyección	Coordenada x	Coordenada y	Unidades
WGS84	-	13°03'36.598"	47°47'21.436"	“Ngrado:min:seg E
WGS72	-	13°03'36.044"	47°47'21.332"	“Ngrado:min:seg E

Datum geográficos	Sistema de proyección	Coordenada x	Coordenada y	Unidades
WGS84	UTM32	32804076.8	5300867.29	Metro
Austria GK	Mercator	20411.31	5294557.38	Metro
MGI-M31	transversal			

A manera de ejemplo, la Tabla 5.6 presenta las coordenadas de dos datum utilizados en Colombia, en dos sistemas que se han traslapado en su uso, el [origen Gauss-Krüger de Bogotá – Magna](#), uno de cinco orígenes utilizados hasta el 2020 y el nuevo único origen nacional CTM12. Recuerde que en la página 46 del documento de [este enlace](#), se reportan los datum utilizados en cada país suramericano.

Descripción para Colombia de la posición de la estación observatorio astronómico de Bogotá y el [origen único](#) según Resoluciones 388 y 471 de 2020.

Tabla 5.6.: Datum utilizados en Colombia

Datum geográficos	Sistema de proyección	Coordenada x	Coordenada y	Unidades
GRS80 / WGS84	Magna - Sirgas	74°04'46.390285" W	4°35'46.3215" N	grado:min:seg
Origen único Nacional CTM12	Transversa de Mercator Secante	73° W	4° N	grado

5.5.1. Clasificación de los sistemas de coordenadas

Los sistemas de coordenadas se pueden clasificar por su dimensionalidad:

- **Los sistemas de coordenadas en 1 dimensión** mapean ubicaciones a lo largo de un río o carretera (conocido como “referencia lineal”), miden la posición por medición de distancia.
- Los **sistemas de coordenadas de 2 dimensiones** son la representación más común en una superficie plana 2D: un mapa, miden la posición por ángulo y/o distancia. Corresponde con sistemas basados en ejes como:
 - Las coordenadas planas que especifican una posición en un plano.
 - Coordenadas rectangulares (coordenadas cartesianas, coordenadas polares, coordenadas de cuadrícula, etc.).
 - Coordenadas geodésicas, coordenadas proyectadas en una cuadrícula.
 - Coordenadas en una superficie curva.
 - Definidas matemáticamente a un modelo de referencia (esfera, elipsoide, longitud/latitud geográfica).
 - Definida físicamente a un modelo de referencia (geoide, coordenadas astronómicas)
- **Los sistemas de coordenadas de 2,5 dimensiones** también incluyen la elevación en un eje z.
- **Los sistemas de coordenadas tridimensionales son modelos 3D** completos. Por ejemplo, de la atmósfera. Corresponden con coordenadas cartesianas espaciales,

sistema de coordenadas geocéntricas X, Y, Z (origen en el centro del elipsoide o en el centro de la Tierra), sistema de coordenadas elipsoidales l, b, H.

Además de la dimensionalidad, los sistemas de coordenadas pueden ser distinguidos por la su origen y unidades:

- Las coordenadas polares están referenciadas a un origen establecido arbitrariamente y permiten un posicionamiento relativo.
- Las coordenadas proyectadas o cartesianas mapean la superficie curva de la Tierra a un sistema de coordenadas cartesianas planas.
- Las coordenadas geográficas describen una ubicación en la superficie de la Tierra por grados angulares al este (de Greenwich) y al norte o sur del ecuador.

5.5.2. Coordenadas polares

El sistema de coordenadas polares (Figura 5.12) es quizás el sistema de referencia espacial más antiguo. La ubicación de cualquier punto arbitrario en la Tierra (el “polo”) se utiliza como el origen desde donde se mide la distancia a otro punto. Las coordenadas esféricas o polares permiten localizar la posición de un elemento espacial mediante la distancia y dos ángulos. A menudo son definidas en grados, minutos y segundos (por ejemplo: N43° 35’ 20”), aunque también pueden expresarse en grados decimales.

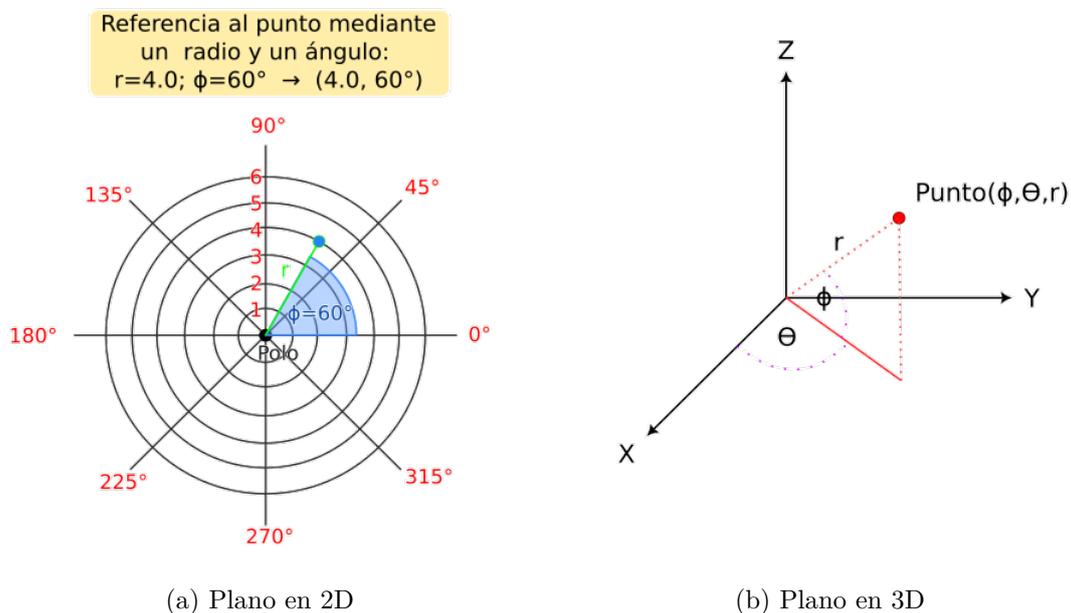


Figura 5.12.: Coordenadas polares en 2D y 3D. Para la referencia en el plano en 3D requiere un ángulo adicional.

En SIG, utilizamos coordenadas polares siempre que queremos localizar fenómenos cuya posición relativa a un punto de referencia específico es importante. Por ejemplo, en la navegación.

5.5.3. Sistemas de coordenadas cartesianas

Si bien es muy conveniente almacenar datos globales en sistemas de coordenadas geográficas, para trabajar con datos espaciales, necesitamos proyectar la superficie curva de la Tierra a un sistema de coordenadas 2D planas. Como la proyección de mapas es una tarea críticamente importante en Geoinformática, dedicaremos una sección completa a las Proyecciones (Lección 6). Por ahora, abordaremos los sistemas de coordenadas planas que se utilizan para los mapas, así como para los análisis espaciales: los sistemas de coordenadas cartesianas.

Nombrados en honor al filósofo y matemático francés **René Descartes** (1596-1650), los sistemas de coordenadas cartesianas (Figura 5.13) son sistemas de coordenadas con ejes ortogonales.

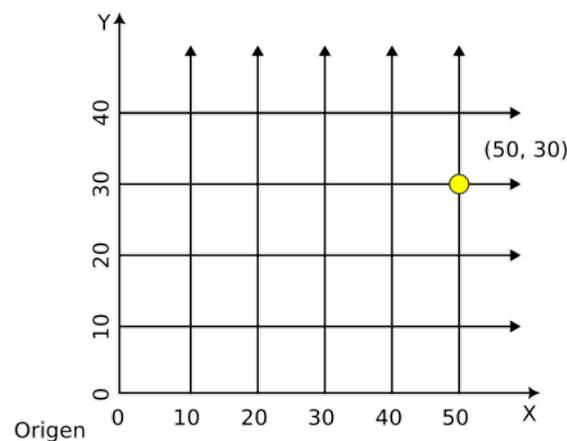


Figura 5.13.: Un sistema de coordenadas cartesianas simple y geométrico.

Para el dominio geoespacial, los sistemas de coordenadas cartesianas se definen de la siguiente manera:

1. A cada dimensión se le asigna un eje (x,y o x,y,z)
2. Los ejes son perpendiculares (ortogonales) entre sí
3. Los ejes horizontales están orientados al norte y al este
4. El plano horizontal coincide con una superficie físicamente definible (superficie del mar)
5. El eje de la tercera dimensión (H) coincide con la dirección de la gravedad (la línea a lo largo de la cual un objeto “cae desde arriba”)

Las coordenadas cartesianas son muy prácticas, ya que **las distancias, áreas y ángulos** se pueden calcular fácilmente en superficies planas. Además, la **orientación apunta al Polo Norte** y la **referencia de elevación es ajustada al nivel del mar**, lo que proporciona una referencia sólida al mundo real.

Para áreas pequeñas, como por ejemplo el plano de construcción de un arquitecto con una escala de 1:100, es perfectamente legítimo simplemente transferir mediciones del mundo real a un sistema de coordenadas cartesianas. Sin embargo, para áreas más grandes, la superficie curva de la Tierra debe tenerse en cuenta. Las proyecciones cartográficas

transforman las coordenadas geográficas de la superficie curva de la Tierra (lon, lat) en coordenadas cartesianas (x, y).

5.5.4. Sistemas de coordenadas geográficas

Los sistemas de coordenadas geográficas (Figura 5.14) utilizan una superficie esférica 3D para definir ubicaciones en la Tierra utilizando grados angulares desde el meridiano principal, por ejemplo, Greenwich (longitud) y los grados angulares desde el ecuador (latitud).

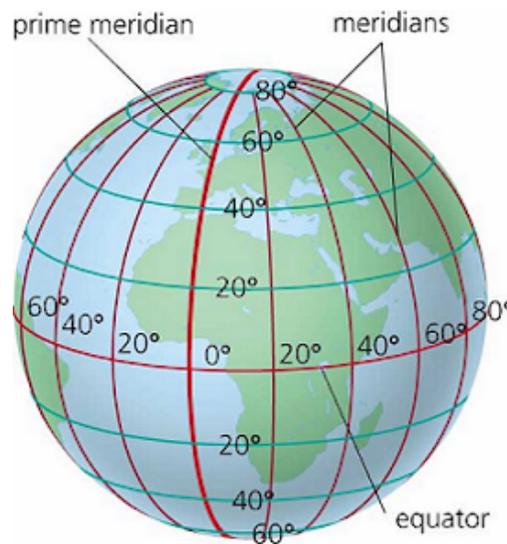


Figura 5.14.: Sistema de coordenadas geográficas

En una sección transversal de la Tierra, se puede ver que el origen del sistema de coordenadas geográficas se encuentra en el centro de la Tierra. El eje X puede apuntar en cualquier dirección **arbitraria** a lo largo del **ecuador**, y el eje Y perpendicular coincide con el **eje geográfico norte-sur** de la Tierra. En la Figura, la ubicación del punto (resaltado con fondo blanco) se define con precisión con las dos coordenadas angulares, la longitud y la latitud.

Las unidades angulares (Figura 5.15), se basan en la división del sistema de 360 grados de un círculo completo: 1 grado (°) se divide en 60 minutos (′), un minuto en 60 segundos (″).

La red de líneas de latitud y longitud que juntas definen el sistema de coordenadas geográficas de la Tierra se denomina **retícula** o **cuadrícula**, la cual se compone de latitudes y longitudes.

5.5.5. Latitud

Latitudes: son círculos que recorren la Tierra paralelos al ecuador (Figura 5.16). A medida que se alejan del ecuador hacia los polos, su circunferencia se acorta gradualmente debido a la forma esférica de la Tierra. Una distancia latitudinal de 1° equivale a unos 111 km en la superficie de la Tierra. El **ecuador** divide la Tierra en dos hemisferios iguales: el hemisferio norte y el hemisferio sur.

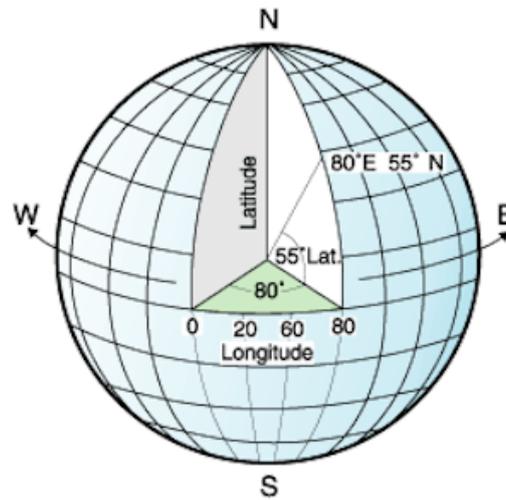
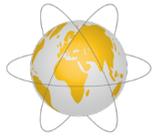


Figura 5.15.: Sistema de coordenadas geográficas y sus coordenadas angulares.

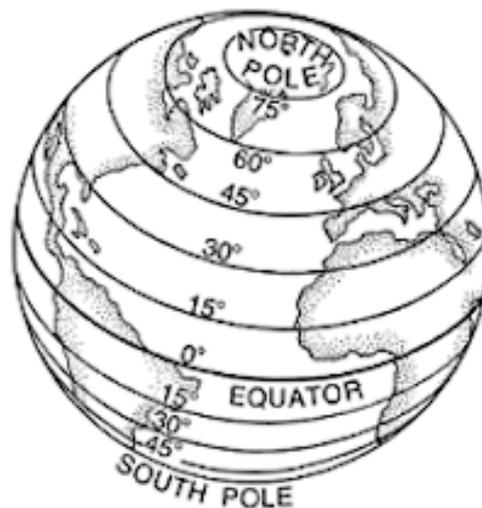


Figura 5.16.: Hemisferios

5.5.6. Longitud

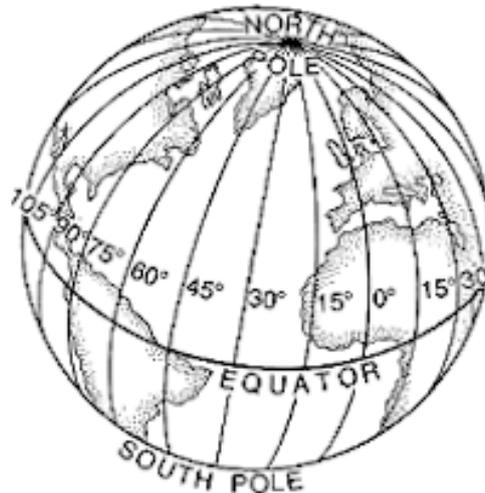


Figura 5.17.: Meridiano cero utilizado anteriormente

Longitudes o **meridianos**: un meridiano es un arco que va de polo a polo (Figura 5.17). La distancia entre dos meridianos es de un grado, por lo que en total tenemos 360 meridianos. La distancia entre meridianos es mayor a lo largo del ecuador, donde 1° equivale a unos 111 km. En Oslo, Noruega, 1° equivale a unos 55 km y en los polos, todos los meridianos convergen con la distancia cero.

El meridiano 0° se llama **meridiano principal**. Por convención, en muchos sistemas de coordenadas geográficas el meridiano principal pasa a través de Greenwich, Inglaterra. Muchos países adoptaron esta convención para sus sistemas nacionales. Aún más importante, el meridiano de Greenwich es el meridiano principal para el sistema de referencia global WGS84, que es utilizado por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

La longitud es también una cuestión de **zonas horarias globales** (Sobel 2005): los puntos a lo largo de un meridiano generalmente tienen la misma hora local. Las líneas longitudinales varían de -180° (longitud oeste / W.) a $+180^\circ$ (este longitud / E). Los dos valores extremos son idénticos y se corresponden (con ciertas excepciones) con la línea de fecha internacional (Figura 5.18).

5.5.7. Otros círculos y líneas

Un **Gran Círculo** es un plano imaginario que atraviesa el centro de la Tierra y lo divide en dos hemisferios iguales. Como se muestra en la Figura 5.19, tanto el ecuador como cada par opuesto de meridianos son casos especiales de Grandes Círculos. Sin embargo, los Grandes Círculos pueden tener cualquier relación, siempre y cuando corten el centro de la Tierra. Esto los hace importantes para la navegación, ya que definen la distancia más corta entre dos puntos de la superficie de la Tierra.

A diferencia de los Grandes Círculos, una **Línea Rumbo** o **Loxodrome** es una línea que cruza todos los meridianos longitudinales en el mismo ángulo entre dos puntos A y B. Esto significa que una brújula siempre tiene la misma dirección basada en el Polo Norte o Sur,

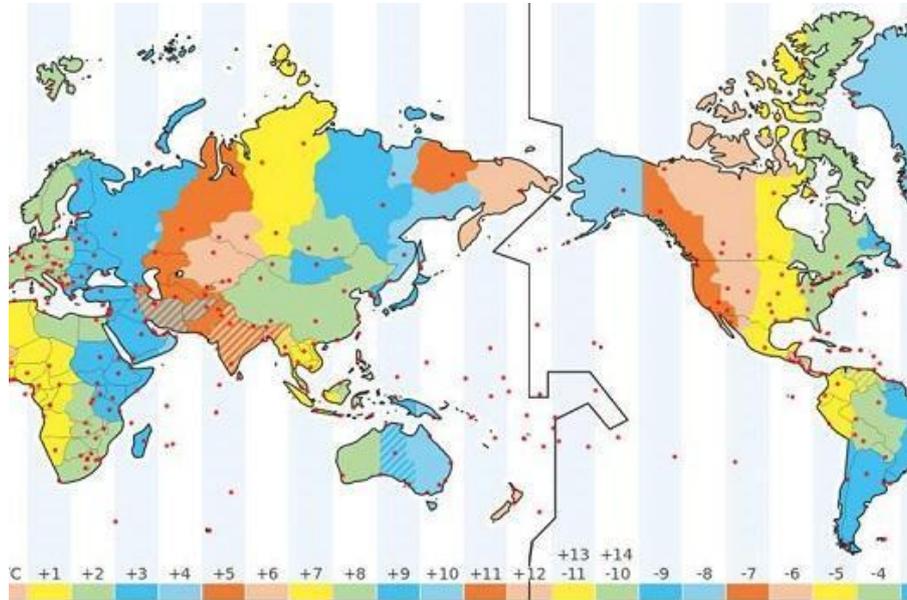


Figura 5.18.: La línea de fecha internacional corre a lo largo del meridiano, que se opone al meridiano principal a través de Greenwich.

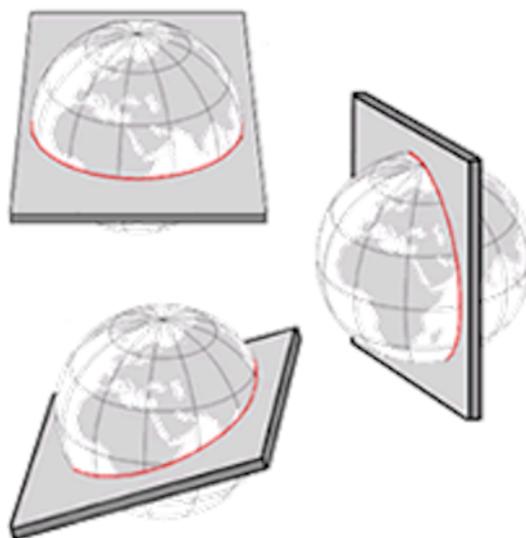


Figura 5.19.: Grandes círculos

como se puede ver en la Figura 5.20. Por lo tanto, la línea rumbo es útil para determinar el curso a seguir para la navegación en el mar o en la aviación. En un mapa que traza franjas meridianas en paralelo, las líneas Rumbo parecen determinar el camino más corto.

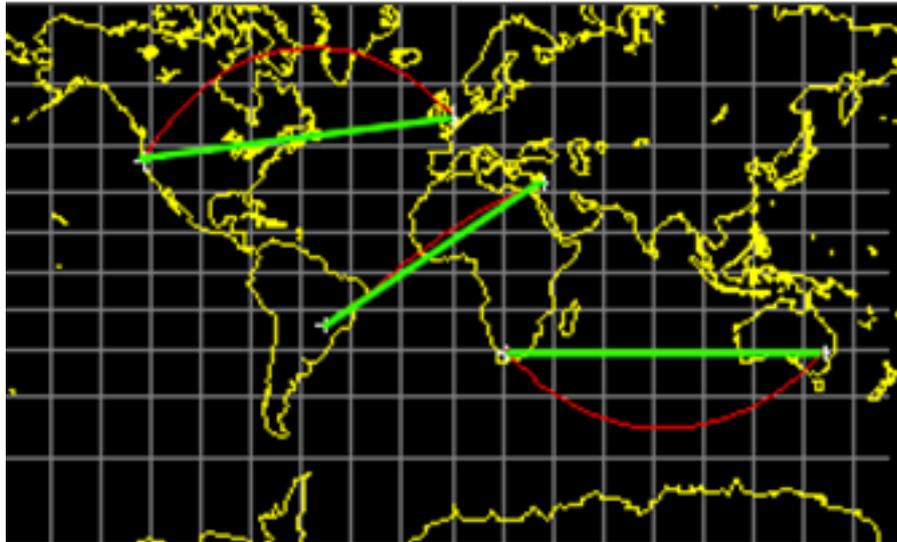


Figura 5.20.: Línea Rhumb (verde)

Sin embargo, aquí nos engaña la distorsión de los mapas 2D: si seguimos la dirección de la brújula en el loxodromo, en la superficie curva de la Tierra en 3D en realidad tomaremos un desvío. Es más corto seguir el Gran Círculo. Considere, por ejemplo, en la Figura 5.21 ¡cómo se enrutan los vuelos globales a lo largo de los Grandes Círculos!



Figura 5.21.: Rutas de vuelo

5.5.8. Unidades angulares

En lugar de utilizar el sistema de grado-minuto-segundo (DMS), las coordenadas a menudo se almacenan en grados decimales (DD), ya que son más fáciles de almacenar y manejar. La conversión es análoga a los minutos y segundos tal como los conocemos a partir de la medición del tiempo, por ejemplo, 30 minutos es medio grado.

Sin embargo, si queremos hacer algún análisis espacial, necesitamos trabajar con medidas métricas, no con grados. El problema es que un SIG siempre funciona sobre una superficie plana 2D. El SIG utiliza las unidades angulares de un sistema de coordenadas geográficas 3D como si fueran medidas métricas en un mapa 2D. Esto introduce errores importantes, ya que los grados varían ampliamente en longitud dependiendo de la ubicación y orientación de la distancia medida. Una distancia de 1° de este a oeste a lo largo del ecuador es de 111 km, pero una distancia de 1° del este al oeste en Canadá es de solo 50 km, mientras que en dirección norte-sur sigue siendo de 111 km.

Advertencia

Si se intenta utilizar coordenadas geográficas para el análisis, su SIG (o cualquier otra aplicación espacial) no devolverá nada más que cifras inmanejables. Por lo tanto, **NUNCA (!) realice análisis espacial sobre coordenadas geográficas**, a menos que esté muy seguro de lo que está haciendo.

Ahora es el momento de relajarse y ver el video enlazado en la Figura 5.22 a continuación para concluir este capítulo sobre sistemas de coordenadas geográficas.

Ahora, ¿puedes ahora definir con confianza la longitud y la latitud?

Si aún no está seguro, la canción lat/lon en la Figura 5.23 se atascará como un gusano del oído y nunca le permitirá olvidar ;).

Si desea saber cómo manejar sistemas de coordenadas en ArcGIS Pro, vea el siguiente video Figura 5.24

5.5.9. Cuestionario

Usando el quiz de la Figura 5.25 asigna las propiedades y propósitos a los sistemas de coordenadas correspondientes. Compruebe si su solución es correcta haciendo clic en el icono de la casilla de verificación azul en la parte inferior derecha.

5.6. Transformación de Datum

Siempre que queramos integrar datos de diferentes fuentes, es necesario considerar la transformación del Datum. La transformación del Datum es una de las tareas más básicas y cotidianas para un experto en geoinformática. Sin embargo, también es un proceso que puede ser una fuente importante de error. A diferencia del cambio de proyección, en la cual se puede pasar de una superficie curva a plana o viceversa, la transformación recalcula las coordenadas.



Figura 5.22.: Video (3:14) Latitud y longitud – explicado de manera simple

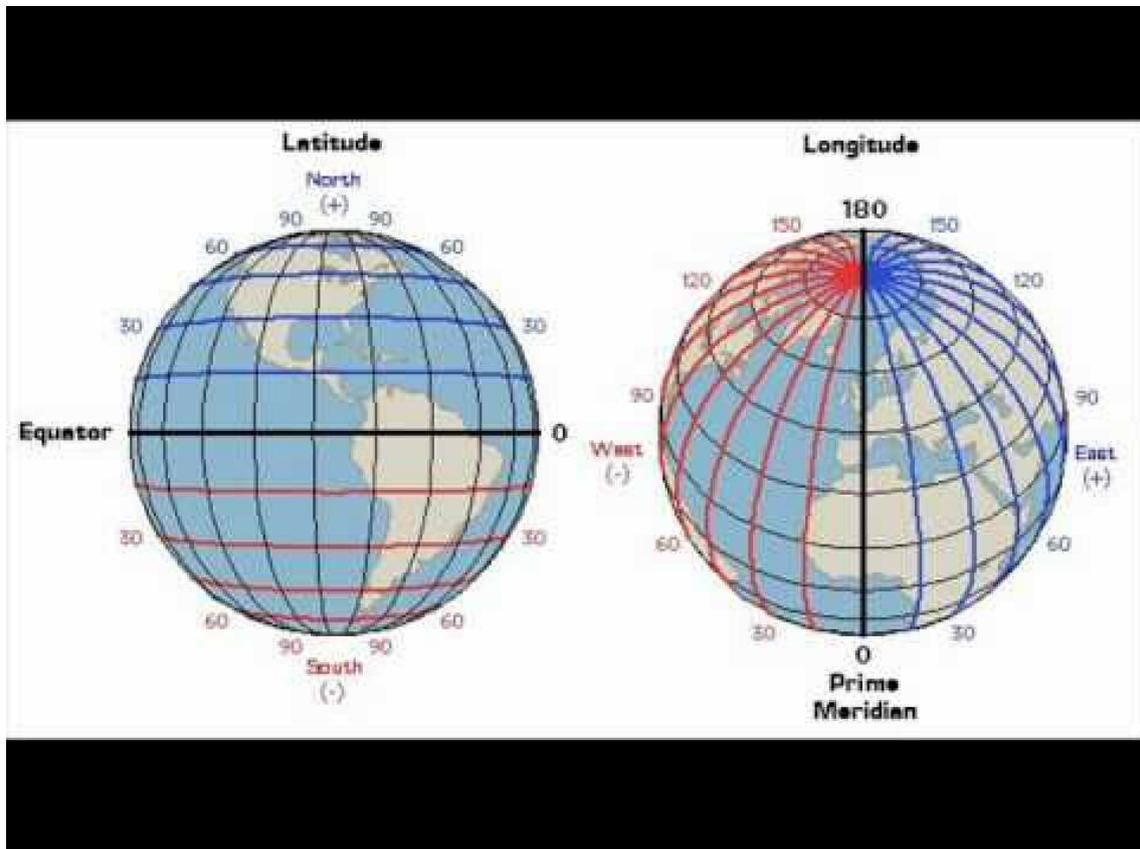
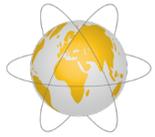


Figura 5.23.: Video (3:14) Latitud y longitud – explicado de manera simple

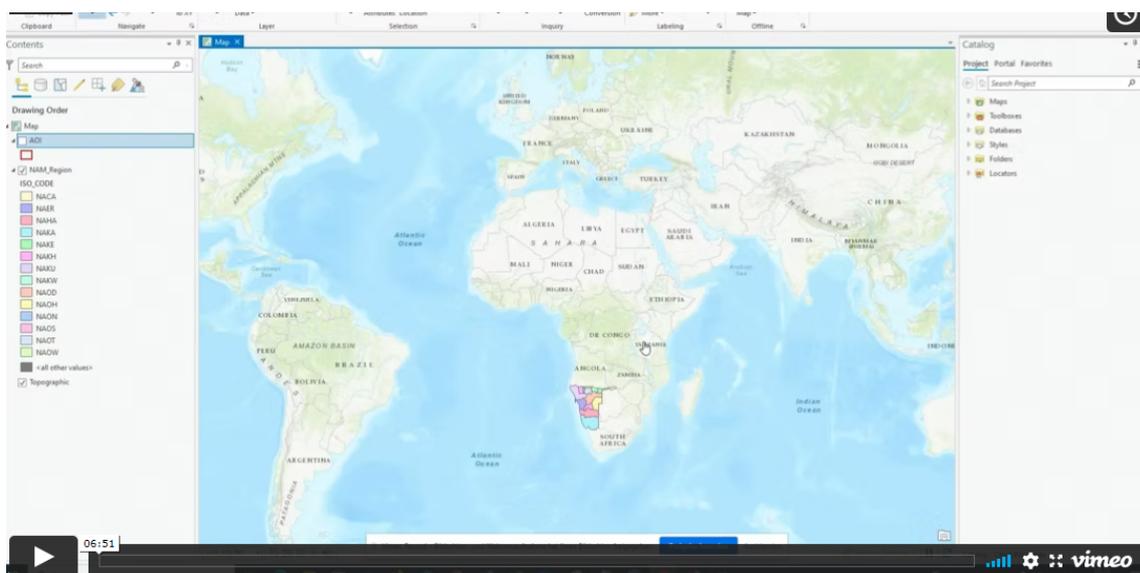


Figura 5.24.: VIDEO (6:51) Proyectos en ArcGIS Pro

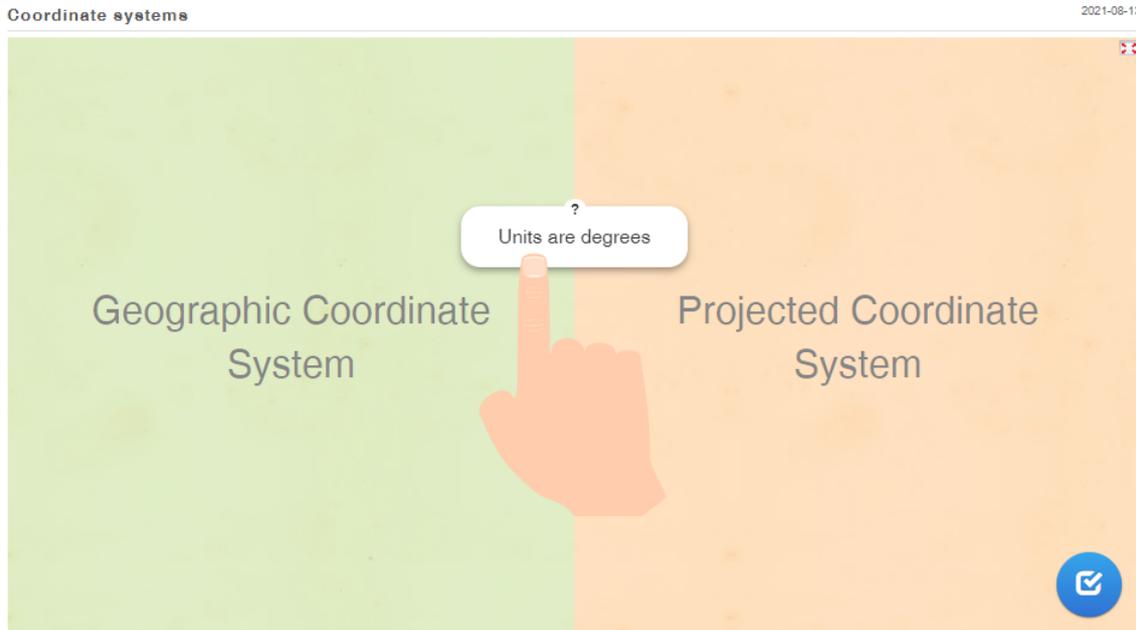


Figura 5.25.: Cuestionario: Emparejar las tarjetas con el sistema de coordenadas correcto:
[Acceder](#)

Al integrar datos espaciales de diferentes fuentes en una base de datos común a menudo necesitamos realizar una de las siguientes tareas:

- Ajustar las coordenadas de la pantalla local o la hoja del mapa en un sistema de coordenadas nacional.
- Cambiar el meridiano en la proyección UTM de Gauss-Krüger.
- Cambiar la proyección del mapa sin cambiar el datum geodésico.
- Cambiar la proyección del mapa y el datum geodésico al mismo tiempo.

Estas transformaciones de mapas se pueden realizar básicamente de dos formas:

- Cambio permanente (transformación) de una base de datos de origen hacia una (nueva) base de datos de destino.
- Transformación temporal, dinámica y en tiempo real (“al vuelo”) para mostrarla en la pantalla.

La transformación de datum se refiere a la recalculación de coordenadas de un datum geodésico a otro. La transformación de datum es una **aproximación matemática** que conduce a un “ajuste” local más o menos bueno. Es como tratar de traer dos superficies grandes, curvadas y orientadas de manera diferente en una cobertura del 100%.

Existen varios métodos más o menos precisos para cambiar el datum geodésico y en algunos casos su elipsoide subyacente. El método que elija utilizar depende de los requisitos particulares de precisión y la disponibilidad de los parámetros de transformación. En algunos métodos de transformación, las coordenadas geográficas se transforman en coordenadas geocéntricas (X, Y, Z -el centro de la Tierra), para que luego se puedan convertir nuevamente en coordenadas geográficas.

En las transformaciones de datum entre dos datum geodésicos locales, uno típicamente realiza una “transformación de datum de 2 pasos” porque los parámetros de transformación para una transformación directa en el otro datum a menudo no están disponibles. En una transformación de 2 etapas, un dato comúnmente global como WGS84 (para el cual se conocen los parámetros de transformación en ambos sistemas locales) se usa como un paso intermedio. Sin embargo, es necesario ser cauteloso en aplicaciones donde el error de ubicación esperado con respecto al datum geocéntrico es crítico. La Figura 5.26 es un ejemplo del desplazamiento que puede producirse si se aplica un datum geodésico incorrecto a un conjunto de datos dado. Esto puede suceder si la información sobre el datum geodésico se ha perdido, no está documentada en los metadatos o si el analista ignoraba los sistemas de referencia espacial.



Figura 5.26.: Desplazamiento de mapa causado por las mismas coordenadas, pero diferentes sistemas de referencia. Ejemplo proporcionado por Petrosys LTD, www.petrosys.com.au/

Existen varios métodos más o menos precisos para transformar datos entre datum geodésicos. El método que se elija depende de los **requisitos particulares de precisión y de la disponibilidad de los parámetros de transformación**.

Un blog de A. Briney explica “corto y dulce” los conceptos básicos de [Datum geodésicos](#).

5.6.1. Transformación de 3 parámetros

La transformación de 3 parámetros es el algoritmo de transformación más rápido y menos preciso. También se llama **traslación geocéntrica**, ya que simplemente desplaza el centro del elipsoide en una dirección dada x, y, z (ver Figura 5.27). El desplazamiento del eje suele oscilar entre 0 y unos pocos cientos de metros. Por lo tanto, la unidad de los parámetros generalmente se da en metros.

El proceso de transformación primero convierte las coordenadas geográficas del elipsoide original (unidades angulares) en un sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas de 3 dimensiones (unidades métricas). Luego, el centro se desplaza a la dirección dada x, y, y, z, y finalmente las coordenadas se convierten de nuevo en coordenadas geográficas del elipsoide objetivo.

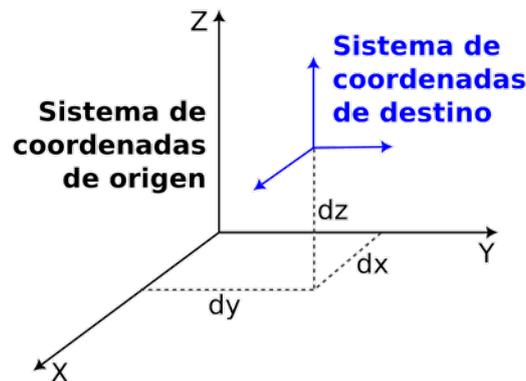


Figura 5.27.: Desviación - iguales coordenadas, pero diferentes sistemas de referencia

Este algoritmo de transformación es ampliamente utilizado, por ejemplo, en dispositivos GPS portátiles, para aplicaciones GPS en el teléfono inteligente o para las transformaciones “al vuelo” en un SIG. Tiene una precisión nominal de unos 5 metros.

Por ejemplo, la transformación de datum geodésicos locales de Suiza CH1903 a ETRS89 utilizando la transformación de 3 parámetros utiliza los siguientes parámetros para la traducción del centro:

- $dX = +674.374$ m
- $dY = +15.056$ m
- $dZ = +405.346$ m

El ejemplo suizo en realidad marca una excepción, ya que proporciona excelentes resultados con una precisión en el rango de centímetros.

5.6.2. Transformación de 7 parámetros de Helmert

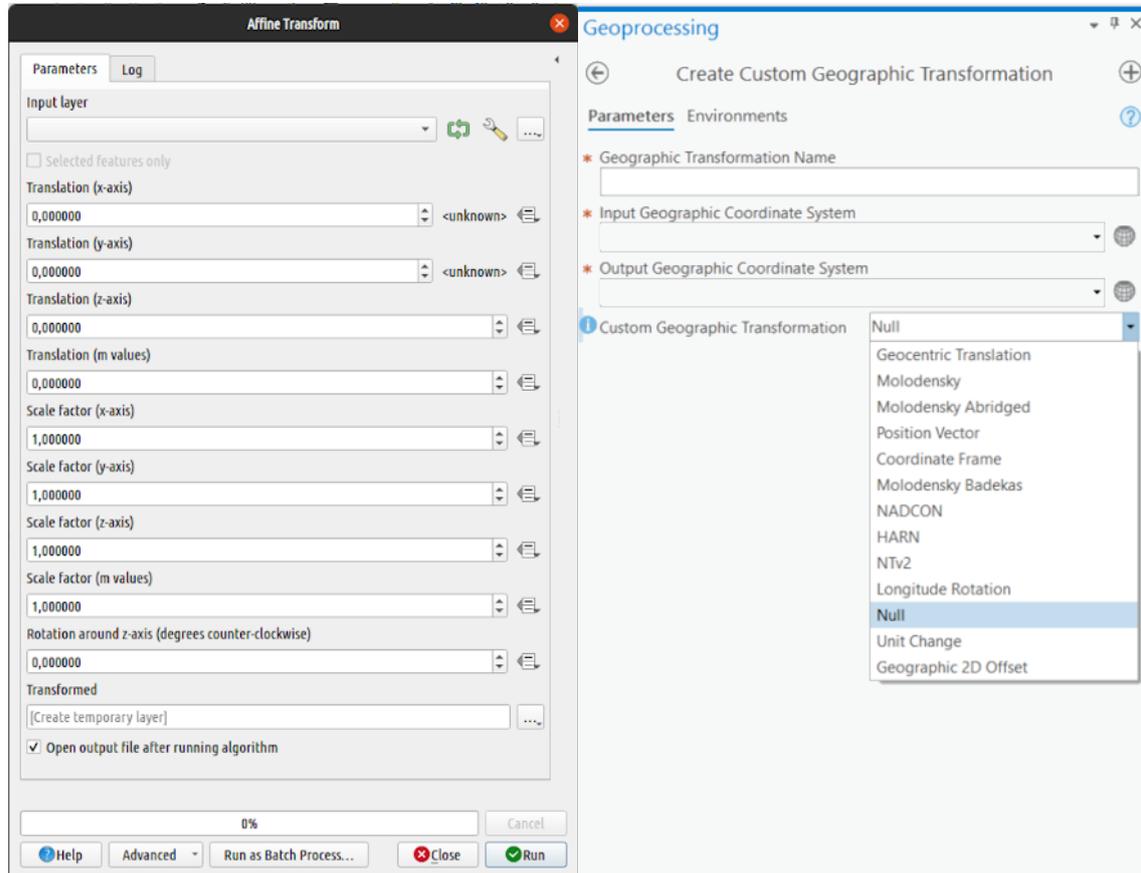
La transformación de 7 parámetros, también conocida como “Transformación de Helmert”, es más precisa en comparación con la transformación de 3 parámetros. Es el algoritmo predeterminado para la transformación de referencia en el software SIG. En esta transformación, las líneas paralelas permanecen paralelas. El punto medio de un segmento de línea permanece como un punto medio, y todos los puntos en una línea recta permanecen en una línea recta. La transformación de Helmert debe a su nombre al geodesta y matemático alemán Friedrich Robert Helmert (1843-1917).

Además de los tres valores de traslación dX , dY y dZ para el desplazamiento del centro del elipsoide, la transformación de 7 parámetros incluye un ángulo de rotación para cada uno de los tres ejes rX , rY , rZ y un factor de escala del eje dS . La rotación generalmente se mide en segundos de arco y el factor de escala en “partes por millón”, por ejemplo, dado un $dS = +3$ ppm, un eje se estira de 1000000 metros a 1000003 metros.

Al igual que en el algoritmo de 3 parámetros, convierte las coordenadas geográficas en coordenadas cartesianas geocéntricas, aplica los factores de desplazamiento, rotación y escala y convierte de nuevo a coordenadas geográficas lat/lon.

Por ejemplo, la transformación de Helmert de 7 parámetros para la transformación de antiguos sistemas a los actuales para Colombia se presenta en la Tabla 6). La Figura 5.28a

ilustra la interfaz de QGIS para realizar la transformación de 7 parámetros y la Figura 5.28b la interfaz para transformaciones geográficas en ArcGIS Pro v2.9.



(a) Qgis - Algoritmo de grass-gis

(b) ArcGIS Pro v 2.9.

Figura 5.28.: Interfaces gráficas de usuario para transformación de 7 parámetros en dos softwares de ejemplo

5.6.3. Transformación de Molodensky

A diferencia de la transformación de 3 parámetros y la transformación de 7 parámetros, este método transforma las coordenadas geográficas directamente sin utilizar un sistema de coordenadas cartesianas como desvío. En principio, la transformación de Molodensky (Figura 5.29) es una traducción geocéntrica con una precisión correspondientemente menor. Este método es ideal cuando el elipsoide de referencia local es paralelo al elipsoide global, es decir, cuando los sistemas de referencia son paralelos (Ramirez y Serpa, 2004). Los parámetros necesarios para esta transformación son las diferencias posicionales del punto central del elipsoide en dirección X, Y y Z (dX , dY , dZ), y las diferencias entre el semieje mayor (da) y el aplanamiento (df) entre los dos esferoides.

Sin embargo, en Geoinformática, la transformación de Molodensky rara vez se usa. La exactitud de este método está alrededor de 5 metros.

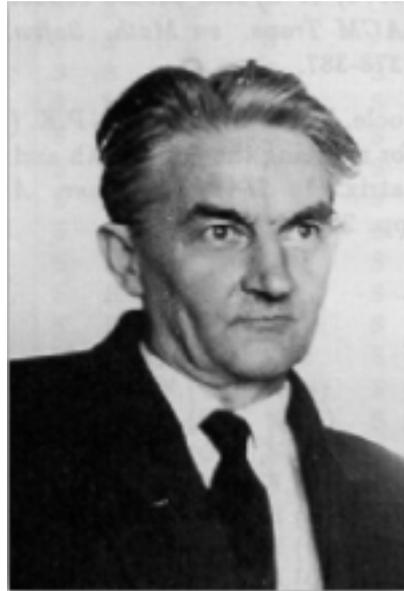


Figura 5.29.: Mikhail Sergeevic Molodenskii (1909 - 1991)

5.6.4. Transformaciones basadas en cuadrícula

Las transformaciones basadas en cuadrícula como la NTV2 (originalmente canadiense), NATCON o HARN (ambos estadounidenses) se basan en una cuadrícula, donde cada ubicación se almacena en ambos sistemas, por ejemplo, en DHDN y ETRS89. En cada punto de la cuadrícula, el desplazamiento entre los dos sistemas se almacena en valores lat/lon.

Entre los puntos de la cuadrícula, el desplazamiento se interpola. Como queremos transformar datos, cada coordenada se mueve de acuerdo con este desplazamiento. Cuanto más fina y exacta sea la cuadrícula de referencia, más precisas serán las transformaciones basadas en la cuadrícula. En general, son los métodos de transformación más precisos y son adecuados para aplicaciones donde se requiere precisión en el rango de sub-metros.

5.6.5. Transformación “al vuelo”

Las transformaciones de mapas se pueden llevar a cabo básicamente de dos maneras:

- Por el cambio permanente (**transformación**) de una base de datos de origen en una (nueva) base de datos de destino
- Transformación temporal, dinámica y en tiempo real (“**al vuelo**”) para integrar visualmente los datos en la pantalla

La **visualización de datos en tiempo real proyectada dinámicamente** - transformación “al vuelo” - tiene grandes ventajas donde se deben mostrar varios conjuntos de datos espaciales de varias fuentes y en diferentes marcos de referencia. En tales escenarios, es necesario acordar un **sistema de referencia común** para la representación de los datos. En muchos GISystems, el sistema de referencia predeterminado del primer conjunto

de datos cargado se utiliza como sistema de referencia de destino para los conjuntos de datos cargados posteriormente.

La transformación al vuelo facilita en gran medida la exploración rápida de los datos. Sin embargo, si decide seguir trabajando con los datos y realizar análisis, debe transformar físicamente los datos. Las transformaciones al vuelo utilizan la transformación de 3 parámetros para la visualización, pero los datos subyacentes no cambian. Por lo tanto, los datos están desalineados entre diferentes capas y por ende son inexactos. Además, la transformación al vuelo es computacionalmente bastante costosa además que se mostrarán más lentamente.

En la Figura 5.30 de [Petrosys LTD](#), el desplazamiento del río es visible (rojo y azul) cuando se utilizan las mismas coordenadas, pero se utilizan diferentes sistemas de referencia.

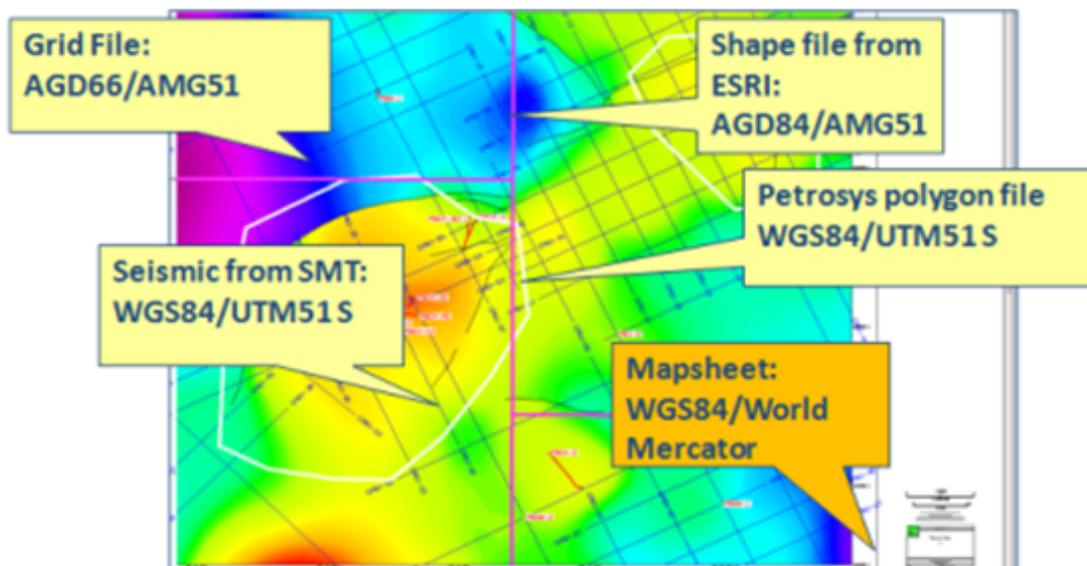


Figura 5.30.: Los datos de diferentes sistemas de referencia de coordenadas geográficas y proyectadas se muestran al vuelo para mostrarlos en un mapa único.

Lección IV.

Proyecciones y Sistemas de Referencia

Presentación de la Lección 4

Objetivos de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Resumen de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

6. Proyección cartográfica

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Lección V.

Recursos SIG

Presentación de la Lección 5

Objetivos de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Resumen de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

7. Recursos SIG

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Lección VI.

Componentes y Funciones de un SIG

Presentación de la Lección 6

Objetivos de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Resumen de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

8. Componentes y Funciones de un SIG

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Lección VII.

Tendencias Actuales en Geoinformática

Presentación de la Lección 7

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Resumen de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

9. Tendencias Actuales

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Lección VIII.

SIG y Sociedad

Presentación de la Lección 8

Objetivos de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Resumen de la lección

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

10. SIG y Sociedad

Contenido restringido

El acceso completo a esta lección será posible cuando sea estudiante del Programa UNIGIS

Vea cómo registrarse aquí:

- MSc GIS+ Maestría de Excelencia: [Acceder](#)
- UNIGIS Professional (Especialización): [Acceder](#)

Referencias

- BKG. 2019. «EVRS Bundesamt für Kartographie und Geodäsie». <https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/DefEVRS/evrs.html>.
- Burrough, Peter A, Rachael A McDonnell, y Christopher D Lloyd. 2015. *Principles of geographical information systems*. Oxford university press.
- Christaller, Walter. 1933. *Die zentralen Orte in Süddeutschland: eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmässigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*. University Microfilms.
- Clarke, Keith C. 2011. *Getting started with geographic information systems*. 5. ed.. Pearson Prentice Hall series en geographic information science. Prentice Hall.
- «EUROGI – European Umbrella Organisation for Geographic Information». 2010. <https://eurogi.org/>.
- Freksa, C, D Mark, y A Frank. 1991. «Cognitive and linguistic aspects of geographic space». En *Qualitative Spatial Reasoning*, 361-72. Kulwer Academic Publishers.
- Goodchild, Michael F. 1992. «Geographical information science». *International journal of geographical information systems* 6 (1): 31-45.
- Harvey, Francis. 2015. *A primer of GIS: Fundamental geographic and cartographic concepts*. Guilford Publications.
- Kimerling, A Jon, Aileen R Buckley, Phillip C Muehrcke, y Juliana O Muehrcke. 2016. *Map use: reading, analysis, interpretation*. Esri Press Redlands, CA.
- L. McHarg, Ian. 1969. *Introduction to Design with Nature, by Ian L. McHarg, vi-viii*. Garden City, NY: The Natural History Press.
- Longley, Paul A, Michael F Goodchild, David J Maguire, y David W Rhind. 2015. *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.
- Mcmaster, Robert B., y E. Lynn Usery, eds. 2004. *A Research Agenda for Geographic Information Science*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038330>.
- Medyckyj-Scott, David, y Mark Blades. 1992. «Human Spatial Cognition: Its Relevance to the Design and Use of Spatial Information Systems». *Geoforum* 23 (2): 215-26. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(92\)90018-y](https://doi.org/10.1016/0016-7185(92)90018-y).
- Mijić, Nikolina, y Gabor Bartha. 2018. «Infrastructure for Spatial Information in European Community (INSPIRE) Through the Time from 2007. Until 2017». En, 34-42. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02577-9_5.
- Montello, DR. 1997. «Unit 006-human cognition of the spatial world». *NCGIA Core Curriculum in Geographic Information Systems*. <http://www.ncgia.ucsb.edu/education/curricula/giscc/units/u006/u006.html>.
- Nyerges, Timothy L, y Piotr Jankowski. 1997. «Enhanced adaptive structuration theory: A theory of GIS-supported collaborative decision making». *Geographical Systems* 4: 225-60.
- Openshaw, Stan, Martin Charlton, Colin Wymer, y Alan Craft. 1987. «A Mark 1 Geographical Analysis Machine for the Automated Analysis of Point Data Sets». *International Journal of Geographical Information Systems* 1 (4): 335-58. <https://doi.org/10.1080/02693798708927821>.

- Piaget, Jean, y Bärbel Inhelder. 1956. *The child's concept of space*. Routledge & Paul.
- Pucha-Cofrep, Franz, Andreas Fries, Fulgencio Cánovas-García, Fernando Oñate-Valdivieso, Víctor González-Jaramillo, y Darwin Pucha-Cofrep. 2017. *Fundamentos de SIG: aplicaciones con ArcGIS*. Ediloja Cia. Ltda.
- Reichardt, Mark. 2017. «Open Geospatial Consortium standards», marzo. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0348>.
- Salazar, D. s. f. «La Tierra». Accedido 10 de noviembre de 2022. <http://gagel.upc.es/>.
- Sánchez Rodríguez, Laura. 2004. «Tipos de coordenadas manejados en Colombia». Instituto Geográfico Agustín Codazzi. https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/tipos_de_coordenadas.pdf.
- Siegel, Alexander W., y Sheldon H. White. 1975. «The Development of Spatial Representations of Large-Scale Environments». En, 9-55. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/s0065-2407\(08\)60007-5](https://doi.org/10.1016/s0065-2407(08)60007-5).
- Sobel, Dava. 2005. *Longitude: The true story of a lone genius who solved the greatest scientific problem of his time*. Macmillan.
- Tobler, Waldo R. 1970. «A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region». *Economic Geography* 46 (sup1): 234-40. <https://doi.org/10.2307/143141>.
- Tomlinson, Roger F. 2007. *Thinking about GIS: geographic information system planning for managers*. Vol. 1. ESRI, Inc.
- US Department of Commerce, NOAA. 2018. «XYZ Conversion Tools. National Geodetic Survey». 2018. <https://www.ngs.noaa.gov/TOOLS/XYZ/xyz.html>.
- Viik, T. 2006. «FW Bessel and Geodesy». *Astronomische Nachrichten* 5: 12.