

UNIDAD DIDÁCTICA V

19. GNSS

19.1.- ¿QUÉ SON LOS GNSS?

El Sistema de Posicionamiento Global o "GPS" fue creado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. Se basa en una constelación, denominada NAVSTAR, formada por 24 satélites que orbitan la tierra a 20.180km de altitud. Esta constelación se completó en 1993.

El objetivo era obtener un sistema de navegación radioeléctricamente pasivo, que no permitiera detectar el vehículo que lo utilizara y que calculara las coordenadas de un punto en cualquier instante, independientemente del vehículo empleado, las condiciones climatológicas y del punto de la tierra considerado.

Los satélites se localizan en seis órbitas, prácticamente circulares, uniformemente distribuidas y con inclinación de 55° respecto al plano del ecuador. Así, con la constelación completa, existirán 4 o más satélites visibles, con geometría favorable, en cualquier zona de la Tierra.

Gracias a la altitud a la que se encuentran los satélites y a la evolución de la tecnología, se eliminan los inconvenientes que sufren otros sistemas y se asegura el cálculo de coordenadas con precisiones de centímetros.

Algunas características de estos satélites son:

- Fabricante: Rockwell International y General Electric.
- Peso: Tipo I, 455Kg; tipo II, 787Kg; tipo II-A y II-R, 930Kg.
- Tamaño: 5,2m (con los paneles extendidos).
- Período orbital: 12 horas.
- Plano orbital: 55° con el plano del ecuador.
- Lapso de vida planificado: 7,5 años.
- Constelación: 21 satélites más 3 de repuesto.

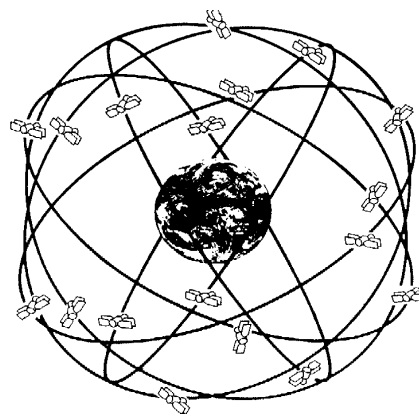


Fig. 19.1. Constelación NAVSTAR

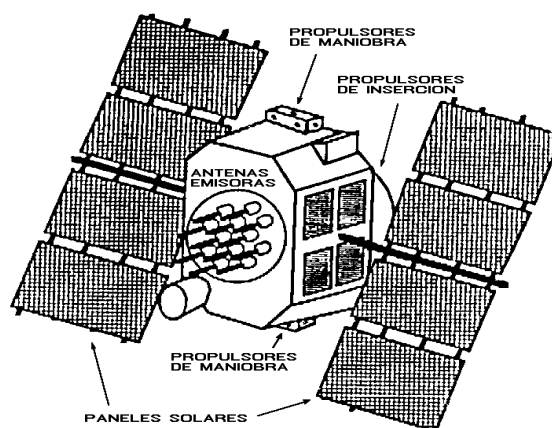


Fig. 19.2. Satélite NAVSTAR (GPS)

Lo más importante del sistema, para nosotros, es su potencial en utilizaciones civiles, donde se está empleando desde los años 80. Con la actual tecnología, los receptores GPS son tan pequeños y económicos que sus aplicaciones son enormes: aviones, barcos, vehículos terrestres, sondas batimétricas, cámaras fotogramétricas, densificación de redes geodésicas, etc.

Existe un sistema semejante creado por el bloque soviético, denominado GLONASS. En la actualidad se fabrican receptores capaces de utilizar ambos sistemas.

Existe un sistema semejante, creado por Rusia, denominado GLONASS y el incipiente sistema europeo GALILEO. Por este motivo se está imponiendo el acrónimo de GNSS (Global Navigation Satellite Systems) en el que se engloban todas las técnicas de posicionamiento mediante satélites y que emplearemos en lo que sigue. En la actualidad ya se fabrican los receptores capaces de utilizar diversos sistemas simultáneamente.

19.2.- CÓMO FUNCIONAN LOS GNSS

El sistema de coordenadas empleado es geocéntrico, es decir, coordenadas cartesianas con origen en el centro de la Tierra. Si se desea se pueden calcular las coordenadas geográficas en los diferentes elipsoides o las proyectadas cartográficas, usando la formulación correspondiente (véanse los capítulos 2 y 3).

Los fundamentos del sistema son muy sencillos. Para entenderlo lo dividimos en cuatro puntos básicos, que facilitan su comprensión; posteriormente lo estudiaremos con mayor profundidad.

- 1.- La base del sistema es la determinación de las coordenadas de un punto, a partir de la medición de distancias, desde satélites, a ese punto.
- 2.- Los GNSS miden las distancias utilizando el tiempo de viaje de una onda radio que contiene un mensaje definido, por lo que se necesitan relojes muy precisos en la medición de cortos periodos de tiempo.
- 3.- Necesitamos saber exactamente la posición en el espacio del satélite que envió la señal.
- 4.- La señal GNSS sufre una serie de retrasos que debemos conocer y cuantificar, para obtener así la medida más exacta de la distancia.

19.2.1.- Medición de la distancia satélite - receptor

El planteamiento básico del sistema es muy sencillo: si estamos a 20.000Km del satélite A, a 21.000Km del satélite B y a 22.000Km del satélite C, sólo existen dos puntos donde se cortarán estas tres esferas (figura 19.3). Para decidir cual de los dos puntos es la verdadera posición podemos hacer dos cosas, o realizar una cuarta medición a otro satélite (veremos posteriormente que esta es la solución válida, pero por razones que ya estudiaremos más adelante), o descartar la

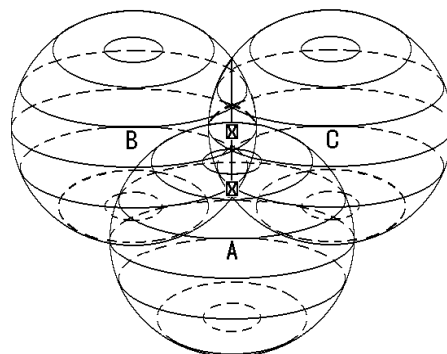


Fig. 19.3. Medición de la distancia satélite - receptor

Cada satélite tiene un código pseudo-aleatorio característico, distinto del de los demás. Además, por emitir a baja potencia, todos los satélites pueden utilizar la misma frecuencia, sin interferirse unos a otros.

- **Medida de fase.**- Además del método de pseudo-distancias, que acabamos de estudiar, existe otro denominado *seguimiento con ayuda de portadora* o medida de fase. Permite al receptor determinar con gran precisión donde está exactamente el inicio del código pseudo-aleatorio, lo que supone mediciones más precisas de la distancia que utilizando el método de pseudo-distancias. El inconveniente de este método es la imposibilidad de trabajar en tiempo real, pero este problema es sólo relativo, pues existen aplicaciones en las que es más importante la precisión que la obtención de coordenadas en tiempo real, como, por ejemplo, mediciones topográficas.

El sistema consiste en comparar una frecuencia de referencia, generada por el receptor, con la frecuencia de la onda captada del satélite, una vez desmodulada. Las frecuencias, tanto la emitida por el satélite como la generada por el receptor, deben ser iguales.

Al controlar la fase, lo que se observa es el desfase entre la señal recibida y la generada por el receptor ($\Delta\phi$, medida en función de la variación 0° - 360°), este valor cambia con la distancia, de manera que permite el conteo de ciclos completos.

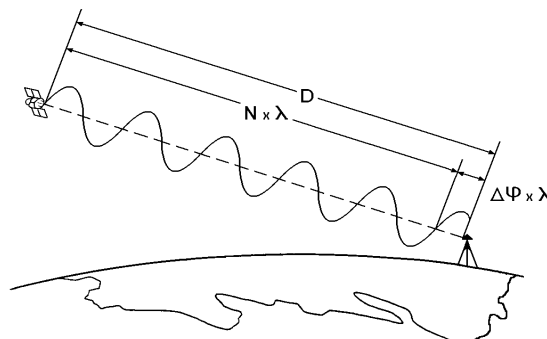


Fig. 19.7. Medida de fase

Al conocer la longitud de onda (λ) de la señal y el desfase, lo único que necesitamos conocer para calcular la distancia es el número de ciclos completos (N) que ha descrito la señal en su recorrido, puesto que la distancia será: $D = \lambda (N + \Delta\phi)$. El valor N se denomina ambigüedad y se obtiene, para un instante determinado, con un proceso de cálculo.

La condición que se debe cumplir, utilizando este método, es no perder el satélite en ningún momento durante la observación, porque esto generaría una interrupción en el conteo de ciclos, lo que es fundamental para el cálculo de la ambigüedad. Sin embargo, se puede recuperar la ambigüedad inicial mediante un proceso de cálculo.

19.2.2.- Medición del tiempo

Los satélites llevan a bordo dos o cuatro relojes atómicos, para garantizar el perfecto funcionamiento, en todo momento, de alguno de ellos. Estos relojes pueden ser

de rubidio, con precisión de 10^{-12} , de cesio, 10^{-13} o de hidrógeno, 10^{-14} . Sobre la frecuencia fundamental de estos relojes se articula toda la emisión del satélite GNSS.

Los relojes atómicos funcionan con energía eléctrica. Deben su nombre a que emplean como base las emisiones energéticas de un átomo en particular. Esta es la manera más exacta de medir el tiempo. La escala de tiempo utilizada en GNSS es uniforme e independiente del tiempo utilizado por nosotros, ya que no se introducen correcciones propiciadas por las variaciones rotacionales terrestres.

Sin embargo, los receptores llevan relojes de cuarzo, que sólo son moderadamente precisos, por lo que en las mediciones de tiempo pueden contener errores. La trigonometría nos permite calcular, a partir de tres mediciones perfectas, la situación de un punto en el espacio tridimensional. Pero también nos permite calcular esta posición a partir de cuatro mediciones que contengan errores. Esta es la razón por la que son necesarias, como mínimo, observaciones simultáneas a cuatro satélites para situar el punto con precisión.

Para entender esto vamos a verlo en el ejemplo siguiente (figura 19.8). Supongamos que el reloj de nuestro receptor está sincronizado con los relojes de los satélites, entonces las tres distancias desde otros tantos satélites definirían un punto, pero como lo más probable es que exista una pequeña desincronización, en este caso, lo que definirían las medidas a los satélites sería un triángulo de una superficie proporcional al error de tiempo.

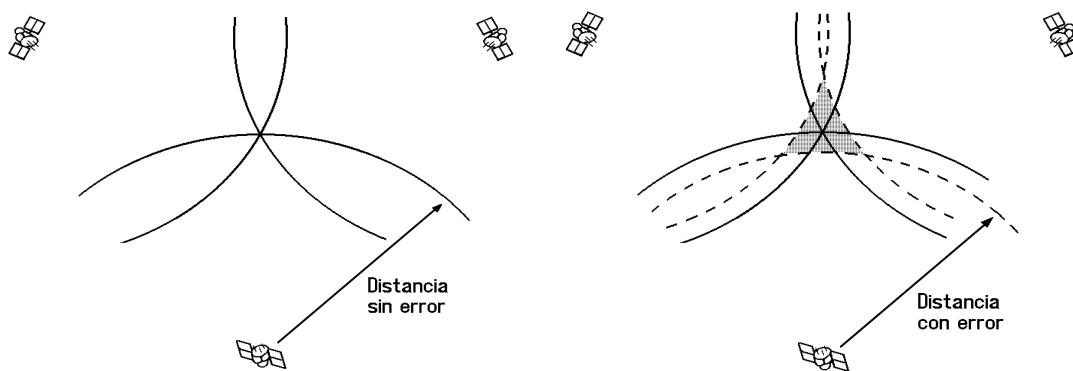


Fig. 19.8. Medición del tiempo

Los ordenadores de los receptores GNSS están programados de forma que, cuando reciben una serie de mediciones que no pueden interceptarse en un solo punto, suponen que la causa es que su reloj sufre alguna desviación. Entonces, mediante un proceso de cálculo, se determina el error del reloj del receptor, que tendrá la misma cuantía para todas las medidas realizadas.

Toda la señal que emite el satélite está estructurada sobre la frecuencia fundamental del reloj atómico, que es $10,23\text{Mhz}$. Se utilizan tres ondas portadoras, denominadas $L1$, $L2$ y $L3$, obtenidas de multiplicar esta frecuencia por unos factores:

$$L1 \rightarrow 10,23\text{Mhz} \times 154 \text{ (factor)} = 1575,42\text{Mhz} \quad \lambda = 19,05\text{cm}$$

$$L2 \rightarrow 10,23\text{Mhz} \times 120 \text{ (factor)} = 1227,60\text{Mhz} \quad \lambda = 24,45\text{cm}$$

$$L3 \rightarrow 10,23\text{Mhz} \times 135 \text{ (factor)} = 1381.05\text{Mhz} \quad \lambda = 21,73\text{cm}$$

Las ondas se denominan *L* porque está situadas en la franja *L* (1000 - 2000Mhz) del espectro electromagnético.

Para poder realizar posicionamientos sobre la portadora *L1* se modula el código *C/A*, o código *S* (Standard Positioning Service), y el *P* (Precise Positioning Service). Sobre la *L2* se modula sólo el código *P*. En ambas se añade un mensaje de navegación que aporta datos del sistema. La tercera frecuencia (*L3*) no se emplea para usos civiles en los sistemas de posicionamiento.

19.2.3.- Determinación de la posición exacta del satélite en el espacio

Para que todo el sistema GPS funcione correctamente, la posición del satélite en el espacio debe ser perfectamente conocida y predecible. A fin de conseguir esto, los satélites se sitúan en órbitas a 20.180Km de altitud, de manera que estén libres de la fricción que se genera al atravesar la atmósfera terrestre. A cada satélite se asigna una determinada órbita, de acuerdo con la constelación definida para el sistema GPS. Con todos estos datos se elabora un *almanaque*, donde se especifica donde se encontrará un satélite en un momento dado, pues contiene información que permite calcular con precisión la órbita del satélite y su posición sobre ésta. Pero la precisión exigida al sistema es tal que la información que suministra el almanaque no es lo suficientemente exacta. Para mejorar esta información y mantenerla constantemente actualizada, los satélites son controlados constantemente por el Departamento de Defensa de EE.UU.

Se indicó anteriormente que el período orbital del satélite GPS es de 12 horas, por lo que pasan diariamente dos veces sobre cada una de las cinco estaciones monitoras, esto da la oportunidad de medir su altitud, posición y velocidad. Estas estaciones de control tienen coordenadas muy precisas, asignadas con sistema VLBI (que calcula las coordenadas en función de la observación de radiofuentes naturales galácticas, como los cuasar), o SLR (que calcula las coordenadas determinando el tiempo de tránsito de un haz láser a satélites dotados de prismas de reflexión total).

Las variaciones que se observan entre la órbita teórica y la descrita realmente por el satélite se denominan errores de *efemérides*. Estos son generalmente de pequeña magnitud y son causados por fenómenos tales como la atracción gravitacional de la Luna y el Sol y la presión de la radiación solar sobre el satélite. Una vez medida la posición de un satélite y calculados los errores de



Fig. 19.9. Estaciones de control

efemérides, se retransmite la información de nuevo a este desde la estación central de Colorado Springs y pasa a engrosar la información emitida por el satélite. La

comunicación entre las estaciones de seguimiento y el satélite se realiza en la banda S (2000 - 4000Mhz).

Los satélites GNSS, que como ya dijimos anteriormente emiten en la banda L, no sólo transmiten un código pseudo-aleatorio, sino que transmiten también un *mensaje de datos* acerca de su exacta situación orbital y del funcionamiento del sistema (estado del reloj, efemérides radiodifundidas, modelo ionosférico, almanaque de todos los satélites). La duración de este mensaje es de *12min 30s*. El receptor GNSS utiliza esta información radiodifundida para actualizar su almanaque interno, y así, definir con precisión la posición de cada satélite.

19.2.4.- Retrasos sufridos por la señal

Todo el sistema hasta ahora descrito parece perfecto, pero existe una serie de fuentes de error difíciles de cuantificar, y por tanto, de eliminar.

La velocidad de la señal GNSS disminuye al atravesar la ionosfera, que es una capa de la atmósfera terrestre situada entre los *100 y 1.000km* de altitud y que contiene partículas cargadas eléctricamente. La cantidad varía en función de la radiación solar, la actividad de las manchas solares y otros fenómenos como el magnetismo terrestre.

La velocidad de la luz sólo es constante en el vacío, pero cuando las ondas atraviesan un medio más denso, su velocidad disminuye proporcionalmente al número de electrones libres encontrados por la señal en su camino. Esta ralentización alterará los cálculos de distancia, puesto que en estos suponemos constante la velocidad de la luz. Además, esta variación no es constante para iguales condiciones de la ionosfera, sino que depende de la posición del punto, la dirección de la onda y del momento de la observación.

Este error se puede reducir utilizando cualquiera de los siguientes métodos: El primero consiste en determinar el error ionosférico, en unas condiciones que corresponden a lo que entendemos por un día medio, y aplicar este factor de corrección a todas nuestras mediciones. Esta no es una solución idónea, pues las condiciones de este día medio no suelen coincidir con las que se dan normalmente en el momento de la observación. Sin embargo, es la única corrección que pueden aplicar algunos tipos de receptores, para lo cual, entre la información emitida por el satélite existe un modelo ionosférico.

El segundo método se basa en el hecho de que cuando la luz atraviesa la ionosfera se decelera a un ritmo inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia. De manera que, cuanto menor sea la frecuencia de la señal, mayor será su deceleración. Así, al comparar el momento de llegada de dos señales de distinta frecuencia y emitidas al mismo tiempo, podemos deducir el valor del retraso que han sufrido y aplicando la corrección calculada podemos eliminar gran parte de este tipo de error. El retraso que puede producir esta zona oscila entre *2 - 50ns (0,6 - 15m)*.

Después de atravesar la ionosfera, las señales GNSS entran en la zona de la atmósfera donde residen los fenómenos atmosféricos (troposfera). El vapor de agua y la temperatura del aire seco también afectan a la velocidad de propagación de las señales, siendo el error introducido por esta última causa mucho más importante (90% del error producido en esta zona). Los errores son del orden de 3 - 100ns (1 - 30m), de los cuales, el correspondiente a la temperatura del aire es fácilmente determinable, pero el debido a la humedad es prácticamente imposible de cuantificar, a no ser por mediciones costosas y realizadas en el momento de la observación. Afortunadamente, su valor neto no es muy importante.

Además de las dos causas de error ya estudiadas, pueden existir otras que también influyan en la precisión final de la medida y que se relacionarán a continuación.

Los relojes atómicos de los satélites pueden sufrir pequeñas desviaciones, para descubrirlas y eliminarlas, se controlan diariamente desde las estaciones de control, pero pueden influir en alguna de las mediciones que realicemos.

Los errores que se localizan en el receptor son: desviaciones de los relojes, redondeos en operaciones matemáticas, interferencias eléctricas que ocasionan correlaciones erróneas entre códigos pseudo-aleatorios, etc.

El error *multicamino* o *multisenda* se produce cuando las señales transmitidas desde los satélites no siguen una línea recta, sino que son reflejadas en distintos lugares antes de alcanzar el receptor, lo que conlleva un cálculo erróneo de la distancia. Para eliminar este error se utilizan técnicas para el procesamiento de la señal, el diseño más idóneo del receptor y, sobre todo, la elección del punto más apropiado para la observación, en caso de que esto sea posible.

Un tipo especial de error multicamino es el que se produce si la antena recibe señales reflejadas en el suelo u objetos cercanos, para evitarlo las antenas tienen una disposición especial, que se estudiará posteriormente.

Para lograr la mejor precisión, los receptores GNSS utilizan un principio de geometría llamado *dilución de la precisión geométrica (DOP)*.

Este principio pone de manifiesto que las mediciones pueden ser más o menos exactas en función de los ángulos relativos entre los satélites que

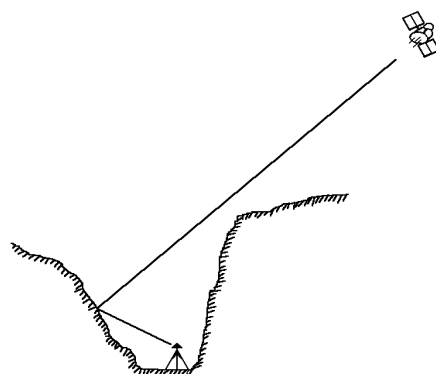


Fig. 19.10. Error multisenda

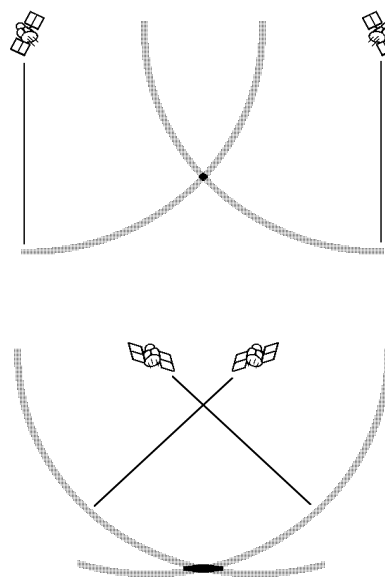


Fig. 19.11. DOP

utilicemos, de manera que aumentan el valor absoluto de todos los errores estudiados anteriormente. El valor de la *DOP* es un factor por el cual hay que multiplicar el error obtenido por todas las causas antes indicadas. Su valor ideal es 1, de manera que, conforme empeoran las condiciones geométricas, el valor *DOP* aumenta.

En todas las figuras anteriores se representó la distancia como una circunferencia de límites bien definidos, pero como sabemos que cada medición de distancia introduce ineludiblemente errores, podemos representar la distancia como una circunferencia cuyo borde es una franja gruesa, lo que indica que representa una distancia +/- un error. Por todo esto vemos que el lugar donde está situado el receptor, que antes aparecía como un punto, ahora es un volumen.

En función de los ángulos relativos entre satélites, ese volumen será pequeño y bien definido o muy estirado y largo (figura 19.11). Por esto, los receptores GNSS eligen los cuatro mejores satélites de todos los que está a la vista, o bien, nosotros debemos indicar al receptor, con ayuda de tablas que representan el almanaque para una zona determinada, que satélites debe seguir. Los receptores más perfectos calculan las coordenadas de un punto en función de todos los satélites a la vista.

Los tipos de *DOP* generalmente utilizados son:

GDOP - Tres coordenadas de posición y estado del reloj

PDOP - Tres coordenadas de posición

HDOP - Dos coordenadas de posición planimétrica

VDOP - Sólo altitud

TDOP - Sólo estado del reloj

En función del tipo de trabajo se utilizará cualquiera de las antes mencionadas u otra a determinar por el usuario.

Por ser un sistema militar, el Departamento de Defensa de EE.UU., puede poner en cualquier momento en funcionamiento el proceso denominado *disponibilidad selectiva* o *S/A*. Este método permite manipular la información emitida por el satélite sobre estado de los relojes y parámetros orbitales, de manera que sólo los usuarios autorizados, con un contraprocés adecuado, obtengan la precisión real. Cuando se trabaja en modo diferencial, método que se explica más adelante, los resultados no son afectados seriamente por el *S/A*, debido a la metodología utilizada.

Distribución e incidencia de los errores:

(Fuente: GPS. Jeff Hurn. Trimble Navigation. Grafinta S.A.)

Error del reloj del satélite		0,60m
Error de efemérides		0,60m
Errores del receptor		1,20m
Errores atmosférico e ionosférico		3,60m
<i>S/A</i> (si se pone en vigor)		7,50m
Total (error medio cuadrático):	sin <i>S/A</i>	4,50m
	con <i>S/A</i>	9,00m

Para calcular el error real, el total anterior debe ser multiplicado por el valor del *DOP*, que variará entre 4 y 6, así la precisión total puede ser:

Típica en un buen receptor	18-30m
En el peor de los casos (sin S/A)	61m
Con la S/A en vigor	107m

19.2.5.- Tipos de posicionamiento en GNSS

A continuación se indican los criterios habitualmente seguidos para la clasificación de los posicionamientos:

- **En función del sistema de coordenadas** a que se quiere referir un punto determinado:
 - 1.- Si se refiere a un sistema de coordenadas previamente definido se denomina *posicionamiento absoluto*.
 - 2.- Si se determina el vector (incrementos de coordenadas) respecto a otro receptor fijo de coordenadas conocidas, se denomina *posicionamiento relativo*.
 - 3.- Si se conocen las coordenadas absolutas de un receptor y se comparan con las que ese receptor está obteniendo en ese instante, se pueden determinar los errores en tiempo real. Esto permite que cualquier otro receptor cercano pueda corregir las coordenadas absolutas en dichos errores y mejorar su precisión. Este método se denomina *posicionamiento diferencial*.
- **En función del movimiento** del receptor:
 - 1.- Si el receptor no se mueve se denomina *posicionamiento estático*.
 - 2.- Si el receptor se mueve se denomina *posicionamiento cinemático o dinámico*.
- **En función del método utilizado para la medida de distancias:**
 - 1.- Medición por pseudo-distancias (resultados en tiempo real).
 - 2.- Medición por medida de fase (resultados en tiempo diferido).
- **En función del momento del cálculo de la posición:**
 - 1.- Medición en tiempo real.
 - 2.- Medición en tiempo diferido o postproceso. Se graban los datos leídos de los satélites y se procesan los datos posteriormente.

Estos tipos de posicionamiento se pueden combinar para dar solución a distintas aplicaciones; así tenemos:

- 1.- Posicionamiento dinámico absoluto (pseudo-distancias).
Ej.: navegador de excursionista, del coche, barco, camión, etc.
- 2.- Posicionamiento dinámico relativo (pseudo-distancias o medida de fase).

Ej.: aproximación al aterrizaje de aeronaves o barcos a puerto, levantamientos de vehículos en movimiento: batimetrías, vuelos fotogramétricos, cartografía de vías de comunicación, etc.

- 3.- Posicionamiento estático absoluto (pseudo-distancias).
Ej.: posicionamiento para levantamientos geográficos, geológicos, biológicos, cuyas precisiones estén relacionadas con escalas gráficas pequeñas.
- 4.- Posicionamiento estático relativo en postproceso (medida de fase).
Ej.: aplicaciones en geodesia y fotogrametría.
- 5.- Posicionamiento estático relativo en tiempo real (medida de fase). Conocido por sus siglas en inglés RTK (Real Time Kinematic). Este es el método más usado por su rapidez en la obtención de las coordenadas y la precisión alcanzada.
Ej.: aplicaciones en levantamientos y replanteos de obras de ingeniería.

En el cuadro adjunto se indican las precisiones aproximadas que se pueden obtener con distintos tipos de posicionamiento:

POSICIONAMIENTO		DINAMICO	ESTATICO
Pseudo-distancias Absoluto	Código C/A	100 m	10 - 30 m
	Código P	10 m	1 m
Pseudo-distancias Diferencial	Código C/A	1 - 6 m	< 1 m
	Código P	< 1 m	< 0,5 m
Medida de fase en modo diferencial		1 - 10 cm	1 cm

Fuente: INFOPROY'93. L. García-Asenjo, A. Rodríguez. GERMAN WEBER y AITEMIN.

19.2.6.- GNSS Diferencial

La precisión de los sistemas GNSS puede mejorar utilizando la técnica de GNSS diferencial, llegando a precisiones de centímetros, por ello, es el método utilizado en topografía.

Si estacionamos un receptor en una localización conocida, es decir, conocemos sus coordenadas por métodos geodésicos, podemos averiguar exactamente qué errores

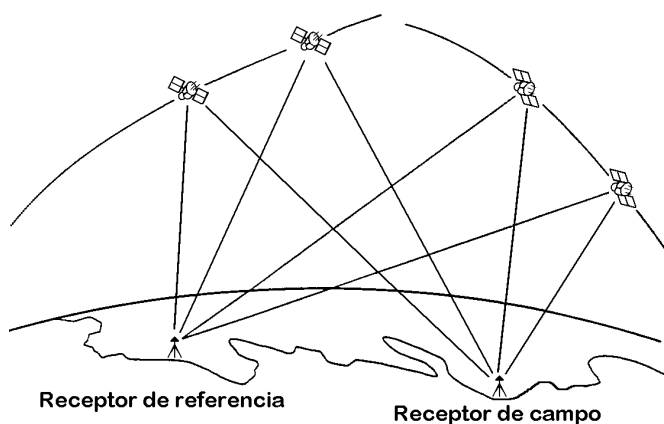


Fig. 19.12. GNSS diferencial

contienen los datos de los satélites al comparar, con aquellas, las coordenadas obtenidas por GNSS. Entonces podemos transmitir un mensaje de corrección de errores a otros receptores situados en esta zona y estos utilizarán esta información para corregir sus posiciones, o bien, utilizar esta información posteriormente para corregir los datos

obtenidos por los demás receptores. El método funciona cuando tanto el receptor de referencia como los de campo están recibiendo los mismos satélites.

Dentro del modo diferencial, el posicionamiento puede ser estático, es decir, estando inmóviles tanto el receptor de referencia como los de campo, o dinámico, en el cual, el receptor de referencia está fijo pero los de campo se mueven y los datos se toman durante el recorrido.

19.2.7.- Receptores

El receptor GNSS está compuesto por una antena, que capta las señales emitidas por los satélites y una unidad de recepción, procesamiento, control y almacenamiento de datos, además de una serie de elementos accesorios como baterías, trípodes, cables de conexión, etc. Como ya se comentó anteriormente, los receptores están dotados de relojes de cuarzo de gran precisión, que no es nunca comparable a la de los relojes atómicos.



Fig. 19.13. Equipo GNSS completo

Lo que se debe tener siempre presente es que lo que se posiciona realmente es el centro radiométrico de la antena, a efectos de posibles correcciones. Todas las antenas están dotadas de un plano de tierra, de manera que sólo recibe por encima de ese plano, a fin de evitar la captación de señales reflejadas por el terreno u objetos adyacentes.

Entendemos por canal en un receptor de GNSS a todo el sistema necesario para captar, seguir y procesar la señal emitida por un solo satélite.

Es fundamental la elección del equipo adecuado en función de las necesidades del trabajo y del presupuesto. Para ello, a continuación, se indican los tipos principales de receptores, así como sus ventajas e inconvenientes.

Existen dos grandes grupos de receptores: los que conmutan secuencialmente de uno a otro satélite y los que pueden seguir simultáneamente cuatro o más satélites.

- Receptores secuenciales.**- Emplean un solo canal que desplazan de un satélite al siguiente para reunir sus datos. Su ventaja principal es que tienen menos circuitos, por lo que son más económicos y consumen menos energía. Sus desventajas son que el seguimiento secuencial interrumpe el posicionamiento, puesto que en un mismo instante sólo puede seguir un satélite, lo que limita su precisión general, además, son más sensibles a las imprecisiones del reloj.

A) Receptores de un canal y escasa energía.- Estos aparatos son portátiles, su alimentación es por pilas. Para limitar el consumo, toman una lectura una o dos veces por minuto y se apagan entretanto. Su aplicación es como posicionador personal o para navegación en barcos pequeños.

B) Receptores de un canal.- No tienen energía limitada por lo que están activados continuamente. Son un poco más precisos que los anteriores. Pueden medir la velocidad con precisión, siempre que no haya variaciones significativas. No pueden emplearse para posicionamiento continuo.

C) Receptores secuenciales rápidos de un canal.- Este diseño es muy similar a los anteriores, pero estos pasan de un satélite a otro mucho más rápidamente. La ventaja está en que realizan mediciones de distancia mientras controlan también el mensaje de datos del satélite. Funcionan continuamente y son menos sensibles a las imprecisiones del reloj. Requieren circuitos mucho más complejos.

D) Receptores secuenciales de dos canales.- Uno de los canales se dedica a controlar continuamente los datos de un satélite, mientras el otro se ocupa de conectar con el siguiente satélite, de manera que nunca se interrumpen sus funciones de navegación, así, las mediciones de velocidad serán más precisas y se cancelarán las imprecisiones introducidas por errores del reloj.

- Receptores continuos.**- Pueden controlar simultáneamente cuatro o más satélites, dando instantáneamente los valores de posición y velocidad. Se utilizan en aplicaciones dinámicas o de gran precisión (topografía y geodesia). Incorporan un número variable de

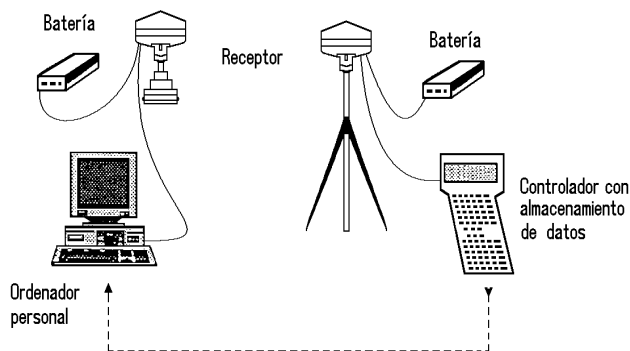


Fig. 19.14. Receptores

canales, generalmente entre 4 y 12. Estos receptores pueden estar conectados directamente a un ordenador personal, o a un teclado de control que descargará posteriormente los datos recogidos para realizar los cálculos posteriores.

Su ventaja es la capacidad de medición continua de una posición y la obtención de mínimos valores de *DOP*. La desventaja es su tamaño, coste y consumo de energía.

19.3.- ESTACIONES PERMANENTES GNSS

19.3.1.- ¿Qué es una Red de Estaciones Permanentes?

Una estación Permanente es un equipo que lee la señal de los satélites continuamente y que pone los datos a disposición de los usuarios que lo deseen, bien en tiempo real mediante GPRS (telefonía móvil) o bien en diferido mediante WEB/FTP (en Internet). Las coordenadas del centro de la antena han sido previamente calculadas con el máximo rigor posible. Si en al cálculo han intervenido varias estaciones permanentes se crea una Red de Estaciones Permanentes.



Fig. 19.15. Ejemplo de Estaciones Permanentes GNSS del Instituto Geográfico Nacional (fuente: ign.es)

19.3.2.- Funciones

Una Red de Estaciones Permanentes GNSS cumple las siguientes funciones:

- Constituir un auténtico marco de referencia geodésico, que complementa a las redes geodésicas tradicionales basadas en vértices fijos.
- Enviar correcciones diferenciales de cada Estación GNSS para que un usuario pueda calcular su posición en tiempo real respecto a ella. La mayoría de redes

ya emiten también lo que se denomina *solución de red*, que consiste en el envío de correcciones calculadas interpolando entre las reales y consiguiendo mejores precisiones.

- Proporcionar datos de las estaciones en formato RINEX para cálculos más precisos en postproceso.
- Almacenar los datos para futuros estudios de investigación entre las Estaciones de la red o con otras estaciones o redes: por ejemplo, en el estudio de movimientos tectónicos.

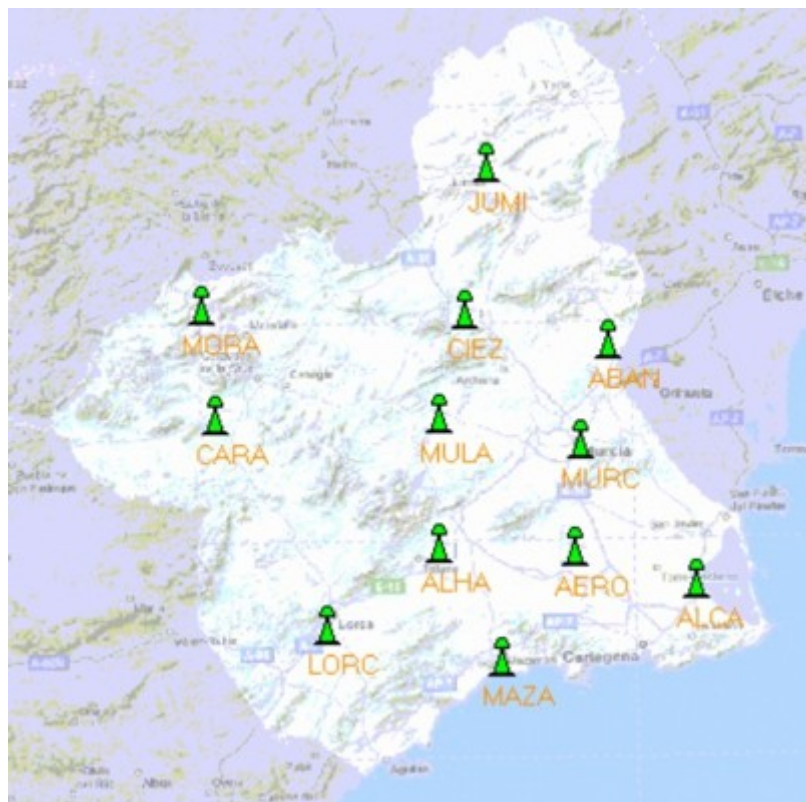


Fig. 19.16. Ejemplo de Estaciones Permanentes de la Región de Murcia (fuente: cartomur.com)

19.4.- APLICACIONES

A continuación se indica una serie de aplicaciones del sistema que deja claro el enorme potencial presente y futuro del GNSS:

- Establecimiento y densificación de redes geodésicas.
- Control de deformaciones terrestres.
- Posicionamiento de cámaras de fotogrametría.
- Establecimiento de bases y redes de replanteo.
- Determinación y localización de cualquier tipo de obra.
- Estudio de evolución de cuencas fluviales.
- Levantamiento batimétricos.
- Actualización de SIG.
- Situación continua e instantánea de un vehículo sobre cartografía digital.
- Navegación en tiempo real con gran precisión.

- Determinación de dirección, velocidad, aceleración, etc., de cualquier vehículo.
- Guiado de vehículos sobre trayectorias prefijadas.
- Localización y control de flotas de vehículos.
- Inventario de redes viales.

20. FOTOGRAMETRÍA

20.1.- INTRODUCCIÓN. OBJETO DE LA FOTOGRAMETRÍA

20.1.1.- Definición y evolución histórica

La *Fotogrametría* es la técnica que permite realizar mediciones a partir de fotografías. Se trata de una técnica de medición indirecta, ya que los trabajos fotogramétricos se efectúan sobre imágenes de los objetos y no sobre los objetos mismos.

A la vista de las modernas aplicaciones de la fotogrametría, que en ocasiones suponen la obtención de datos no solo de la forma y la posición sino también de los cambios en forma y posición de los objetos fotografiados, la definición anterior puede resultar insuficiente. *W. Rüger* sugirió definirla como una técnica de medición indirecta que permite determinar el estado geométrico de un objeto, su variación con el tiempo y la distancia recorrida por el mismo.

La obtención de mediciones a partir de fotografías del objeto o fenómeno a estudiar se denomina *restitución fotogramétrica*. La restitución sería la operación inversa a la toma de fotografías: a partir de las imágenes se reconstruye el objeto o fenómeno original.

Los principios teóricos de la fotogrametría se enunciaron incluso antes del invento de la fotografía. Fue a partir del desarrollo de ésta cuando algunos técnicos se interesaron en la posibilidad de realizar mediciones sobre las imágenes fotográficas. Los primeros trabajos serios fueron llevados a cabo por *Laussedat* durante el siglo XIX. El principal inconveniente con el que se encontraba la fotogrametría en esta primera fase, denominada *Fotogrametría ordinaria*, radica en la dificultad de identificar un mismo punto en fotografías tomadas desde sitios distintos. Este problema no se resolvió de forma satisfactoria hasta que *Terrero* y *Hauck* desarrollaron el *principio de los planos nucleares*.

La gran cantidad de cálculos a efectuar para determinar las coordenadas terreno de los puntos en las fotografías complicaba enormemente el empleo de la fotogrametría, hasta que en 1901 *Pulfrich* desarrolló el *estereocomparador* aplicando el principio de la visión estereoscópica o visión en relieve. Esta etapa, denominada *Estereofotogrametría analítica*, termina con la invención del *estereoautógrafo*, debida a *von Orel* (1910). A partir de entonces se emplearon fundamentalmente aparatos de restitución automática, por lo que esta etapa se ha denominado *Estereofotogrametría automática*.

Desde los años 60 del pasado siglo los avances en el campo de la informática han propiciado una vuelta a los tiempos de la fotogrametría analítica. Gracias al apoyo de los ordenadores electrónicos se desarrollaron equipos mucho más económicos y precisos a partir de los antiguos estereocomparadores.

Hacia 1990 se empieza a trabajar con imágenes digitales y estaciones fotogramétricas digitales. Esta nueva etapa supone un cambio sustancial en cuanto al soporte de la información, a los equipos empleados, a la posibilidad de automatizar procesos y al tipo de resultados obtenidos. Por tanto, muchos autores dividen la historia de la Fotogrametría en tres etapas:

- *Fotogrametría analógica*, hasta 1960 aproximadamente.
- *Fotogrametría analítica*, hasta 1990 aproximadamente.
- *Fotogrametría digital*.

20.1.2.- Fotogrametría aérea y fotogrametría terrestre. Aplicaciones

Desde sus principios y hasta el desarrollo de la aviación la fotogrametría fue fundamentalmente terrestre, es decir realizada a partir de fotografías tomadas desde el suelo y con direcciones de toma generalmente horizontales. En la actualidad, la fotogrametría aérea, con fotografías tomadas desde el aire y ejes de toma aproximadamente verticales, es la que se emplea en casi todas las aplicaciones cartográficas.

En efecto, la fotogrametría terrestre presenta grandes inconvenientes en este campo debido a la gran cantidad de zonas ocultas que quedan cuando el relieve es mínimamente accidentado o existe arbolado. Sin embargo, es muy adecuada para otras aplicaciones: fotogrametría de objeto cercano y microfotogrametría.

El campo de aplicación de la fotogrametría es muy amplio. Como ejemplos de aplicaciones pueden citarse:

- Cartografía convencional a todas las escalas.
- Cartografía digital. Modelos digitales del terreno.
- Arquitectura, conservación y restauración de monumentos y obras de arte.
- Medicina.
- Evolución espacial y temporal de masas líquidas y gaseosas.
- Balística.
- Investigaciones policíacas, accidentes, etc.
- Control de grandes taludes, movimientos sísmicos, etc.
- Fotogrametría industrial.

En general, las aplicaciones cartográficas son propias de la fotogrametría aérea mientras que las restantes aplicaciones se obtienen mediante fotogrametría terrestre. En ambos casos se emplean las mismas técnicas e incluso los mismos equipos de restitución. Por tanto, lo que sigue es válido tanto para fotogrametría aérea como para fotogrametría terrestre.

20.2.- FUNDAMENTOS DEL MÉTODO

20.2.1.- Proyección central y proyección ortogonal

Habitualmente interesará obtener un plano, es decir una proyección ortogonal, del terreno o del objeto fotografiado. Sin embargo, una fotografía es, en el caso ideal, una proyección central. La restitución fotogramétrica consistirá, por tanto, en transformar la proyección central de las fotografías en la proyección ortogonal que nos interesa.

En una proyección ortogonal las posiciones planimétricas de los puntos imagen son las mismas que las de los puntos del terreno original, ya que estos se proyectan perpendicularmente al plano de referencia.

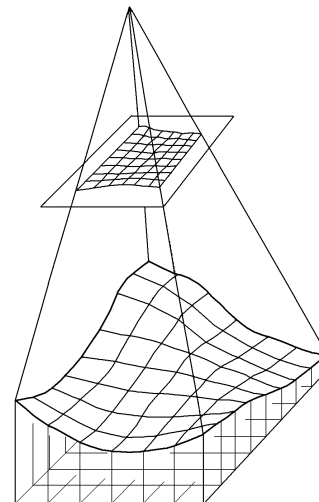


Fig. 20.1. Proyección central y proyección ortogonal

En la proyección central (figura 20.1) todos los rayos proyectivos pasan por el centro de proyección, que en una cámara fotográfica sería el objetivo, lo que hace que la imagen obtenida (fotografía) sea muy distinta a la que se habría obtenido con una proyección ortogonal. Las diferencias entre los resultados de ambos tipos de proyección dependen de la forma del objeto fotografiado.

En efecto, un punto A como el de la figura 20.2 se representaría, en proyección central, en *a* y no en *a'* que es la representación de su proyección ortogonal sobre un plano horizontal de referencia. El resultado es que las imágenes de los puntos más próximos al objetivo se alejan del punto central de la proyección, mientras que las de los puntos más alejados del objetivo se acercan a dicho punto.

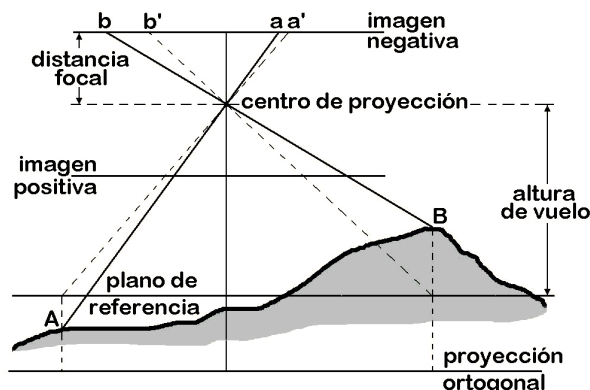


Fig. 20.2. Deformaciones en la imagen en la proyección central

Por otra parte, la escala en una fotografía no es uniforme. Las zonas más próximas al objetivo aparecen con una escala mayor y las más lejanas con una escala menor. En fotogrametría no se puede hablar de escala más que si nos referimos a la correspondiente a un plano de referencia.

El problema se complica si consideramos que, a menudo, el plano que contiene a la película fotográfica (negativo) no es paralelo a dicho plano de referencia. Esto es habitual en

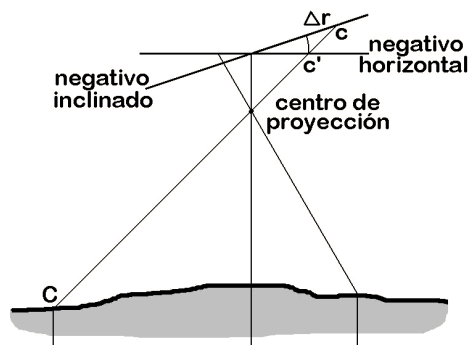


Fig. 20.3. Deformaciones en la imagen debidas a la inclinación del negativo

fotogrametría aérea, donde las oscilaciones del avión durante la toma de las fotografías impiden que el negativo ocupe una posición perfectamente horizontal. El efecto de la inclinación del eje de toma puede apreciarse en la figura 20.3 y viene a añadirse a las deformaciones propias de la proyección central, que ya se han comentado.

20.2.2.- Visión estereoscópica. Concepto de paralaje.

La visión estereoscópica es la propiedad de nuestra vista que nos permite determinar las posiciones relativas aproximadas de los objetos que estamos observando. Esto se consigue gracias a que el cerebro humano recibe una información visual tridimensional al ser capaz de combinar las imágenes distintas, debido a su diferente posición, que percibe cada uno de nuestros ojos.

Por la misma razón, si observamos dos fotografías de una misma zona pero tomadas desde puntos distintos podremos apreciar una imagen tridimensional de la zona común a las fotografías, siempre que observemos una de ellas con cada ojo y las fotografías se hayan situado previamente en posiciones geométricas similares a las que ocupaban los negativos en el momento de la toma (figura 20.4). Para facilitar la visión estereoscópica se utilizan estereoscopios, anaglifos (imágenes coloreadas) o luz polarizada.

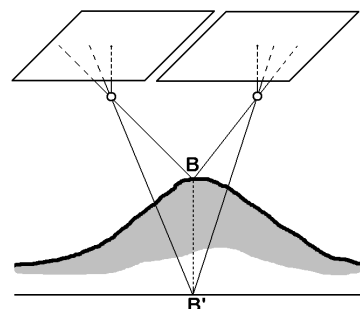


Fig. 20.4. Modelo estereoscópico

Puesto que las dos fotografías se habrán tomado desde sitios distintos, las posiciones de las imágenes de un punto dado en cada una de ellas serán distintas. La diferencia de posición de dos puntos homólogos en las dos fotografías se denomina *paralaje* (figura 20.5). En un vuelo fotogramétrico, en el que se van tomando fotografías del terreno sobrevolado a medida que el avión se desplaza, llamaremos eje X al paralelo a la dirección de vuelo y eje Y el eje horizontal perpendicular a ésta. De esta manera, la paralaje en el sentido Y (P_y) nos impediría la visión estereoscópica a menos que la eliminemos situando las fotografías de forma adecuada, mientras que la paralaje en el sentido X (P_x) nos permitirá determinar las altitudes de los puntos de las fotografías.

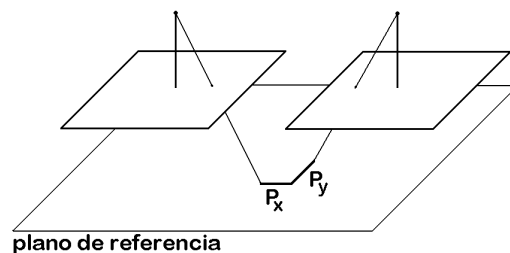


Fig. 20.5. Paralajes

20.2.3.- Método general de la fotogrametría

Los problemas planteados por la proyección central, y explicados en 20.2.1, quedarían resueltos si fuese posible reconstruir el modelo del terreno original a partir de una fotografía aislada. Para ello sería preciso, en primer lugar, conocer la posición del punto central de la proyección (objetivo) y del plano de proyección (negativo) durante la toma. Uniendo el punto central con los distintos puntos de la fotografía reconstruimos el

haz de rayos proyectivos pero, a partir de éste, no es posible conocer la posición de los puntos originales del terreno.

Además, como hemos visto, normalmente no se conoce en fotogrametría aérea la posición espacial exacta del plano de proyección con relación al centro de proyección. En este caso ni siquiera la posición del haz proyectivo puede ser reconstruida.

La solución a este problema viene del empleo de pares de fotografías tomadas desde puntos distintos pero cubriendo un área común. Situando adecuadamente los dos fotogramas que componen uno de estos pares, los dos rayos proyectivos (uno por cada fotograma) correspondientes a un punto determinado se cortarán en un lugar del espacio, donde se formará una imagen de este punto. Estos rayos proyectivos se forman uniendo cada centro de proyección con el punto homólogo del fotograma correspondiente. Utilizando el par de fotogramas es posible crear un modelo estereoscópico (tridimensional) que reproduzca el terreno original (figura 20.6).

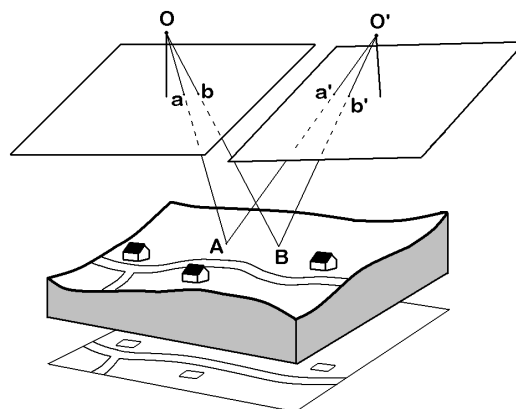


Fig. 20.6. Modelo estereoscópico

Sin embargo, el modelo creado estará deformado respecto al original ya que las posiciones de la cámara en cada una de las dos tomas no son conocidas. Para adaptar fielmente el modelo al terreno es preciso contar con una serie de *puntos de apoyo* bien identificados en los fotogramas y cuyas coordenadas terreno se conozcan. Las operaciones necesarias para obtener un modelo estereoscópico que reproduzca fielmente, a una escala determinada, el terreno original constituyen el proceso denominado *orientación*.

La observación del modelo estereoscópico puede hacerse gracias al *principio de la marca flotante*. Si se sitúan marcas (cruces, puntos luminosos, la punta de un estilete, etc.) sobre puntos homólogos de un par de fotogramas orientado, al observarlo estereoscópicamente dichas marcas aparecen como una sola apoyada sobre la imagen estereoscópica del punto. Se dice entonces que la marca está *posada* sobre el punto. Aumentando o disminuyendo la paralaje P_x de la marca ésta aparecerá como hundida en el terreno o flotando sobre él.

En este principio se basan casi todos los restituidores fotogramétricos: disponen de dos índices móviles, uno por fotograma, cuyas posiciones y paralaje son conocidas. Si modificamos estos parámetros y situamos el índice de forma que aparezca apoyado sobre un punto del modelo estereoscópico los parámetros de dicho punto coincidirán con los del índice y al ser estos conocidos lo serán aquellos. A partir de estos parámetros es posible calcular las coordenadas terreno del punto observado.

20.2.4.- Fotografías y fotogramas. Definiciones geométricas

En fotogrametría se emplean las siguientes definiciones geométricas:

Punto principal.- Es la proyección ortogonal del centro de proyección (objeto) sobre el plano de proyección (negativo). El punto principal ocupará la posición central en la fotografía.

Punto nadiral.- Intersección de la recta vertical que pasa por el centro de proyección con el plano de proyección. El punto nadiral es el punto de fuga de todas las rectas verticales en la proyección. Si el eje de toma es perfectamente vertical, negativo perfectamente horizontal, coincide con el punto principal.

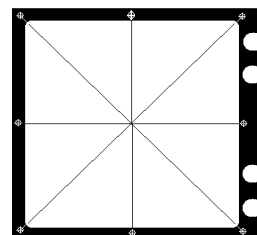


Fig. 20.7. Fotograma

Recta principal.- Recta que une el punto principal y el nadiral.

Distancia principal.- Distancia entre el centro de proyección y el punto principal. Equivale a la distancia focal de la cámara, ya que este tipo de fotografías siempre se enfoca al infinito.

Angulo de inclinación.- En fotografías aéreas, el ángulo que forma la dirección de la toma con la vertical.

En función del ángulo de inclinación existen tres tipos de fotografías aéreas:

- Verticales: Presentan una inclinación respecto a la vertical menor que 3° .
- Oblicuas: Inclinación mayor que 3° pero sin que en la fotografía aparezca el horizonte.
- Panorámicas: Fotografía en la que aparece el horizonte ($\alpha < \gamma$).

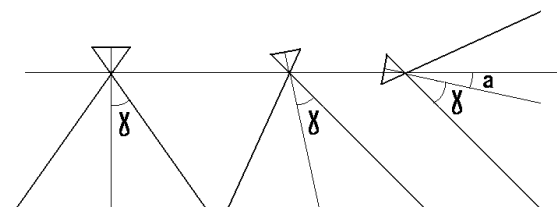


Fig. 20.8. Tipos de fotografías aéreas según la inclinación de la toma

Llamamos *fotograma* a una fotografía en la que se conoce la posición del punto principal, la distancia focal y las deformaciones o distorsiones en la imagen propias de la cámara empleada. Los clisés utilizados en fotogrametría aérea (figura 20.9) llevan unas marcas en las cuatro esquinas llamadas *marcas fiduciarias*. Si unimos mediante rectas las marcas de esquinas opuestas, la intersección de las dos rectas nos determina el punto principal del fotograma. En fotogrametría terrestre las marcas se sitúan a mitad de los lados del fotograma, de forma que también nos permitan determinar la línea de horizonte. Las dimensiones más usuales de los fotogramas son $23 \times 23 \text{ cm}$ para aérea y $13 \times 18 \text{ cm}$ para terrestre.



Fig. 20.9. Fotograma

Además de las marcas fiduciarias, los fotogramas aéreos suelen llevar impresos en el

borde los siguientes datos (figura 20.10):

- Nivel esférico, para conocer la inclinación aproximada del eje de toma
- Altímetro, para conocer la altitud aproximada en el momento de la toma
- Reloj, para conocer la hora de la toma
- Tipo y características de la cámara (distancia focal)
- Número de identificación



Fig. 20.10. Información en el borde de un fotograma

Las imágenes digitales se obtienen mediante sensores o digitalizando (mediante escaneado de alta resolución) imágenes analógicas. Se componen de *pixels* (*picture element* o *elemento de imagen*) y, al contener información numérica (figura 20.11), pueden someterse a operaciones de filtrado, realzado, etc. Sobre este tipo de imágenes pueden, además, aplicarse algoritmos como los de identificación de puntos homólogos.

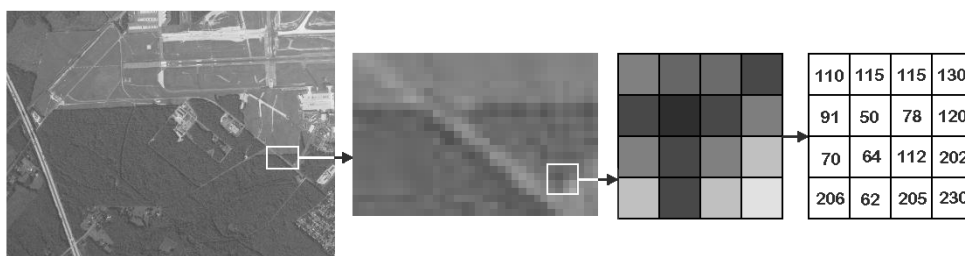


Fig. 20.11. Imagen fotográfica digital

20.3.- ORIENTACIÓN DE PARES DE FOTOGRAMAS

Se denomina orientación de un par de fotogramas a la operación consistente en situarlos en posiciones idénticas a las que ocupaban cuando fueron tomados, de manera que sea posible reconstruir completamente la proyección central. Las intersecciones en el espacio de los rayos proyectivos homólogos formarán un modelo tridimensional de la zona común a ambos fotogramas. Utilizando el equipo adecuado es posible restituir dicha zona a partir de la observación estereoscópica del modelo.

Mediante la orientación se establece una correspondencia entre los distintos sistemas de coordenadas que aparecen en el proceso fotogramétrico:

- **Coordenadas fotografía.-** Sistema de coordenadas planas X, Y con origen en el punto principal de la fotografía. El eje X sigue la dirección del vuelo y el Y es perpendicular a él.
- **Coordenadas modelo.-** Sistema tridimensional que corresponde al modelo estereoscópico obtenido tras orientar el par. Se toma como origen de coordenadas el centro de proyección del fotograma izquierdo, eje X según la dirección del vuelo y eje Z según la recta que une el centro de proyección y el punto principal del mismo fotograma.

- **Coordenadas terreno.**- El sistema de coordenadas (normalmente UTM) que se emplee para representar los resultados de la restitución fotogramétrica.

La orientación puede hacerse por métodos mecánicos, normalmente a base de tanteos sistemáticos, o por métodos analíticos, calculando analíticamente la magnitud de las operaciones a efectuar. Con restituidores automáticos se empleaba el primer sistema; con los modernos restituidores apoyados en ordenadores el segundo sistema es el empleado.

20.3.1.- Orientación

Orientación interna. Para orientar un par de fotografías debemos, en primer lugar, conocer las condiciones en que se realizó la proyección central, es decir la posición del punto principal en cada fotografía y la distancia principal (distancia focal) de la cámara. Estas condiciones se conocen como *parámetros de la orientación interna* y son características del tipo de cámara empleado. Se determinan mediante un proceso de calibración de la cámara

Conocidos los parámetros de la orientación interna, se puede reconstruir la forma de los haces de rayos proyectivos pero no sus posiciones en el espacio, por lo que aun no es posible formar el modelo estereoscópico.

Con restituidores digitales es posible incorporar correcciones para tener en cuenta las deformaciones debidas a la distorsión del objetivo de la cámara e incluso a la curvatura terrestre y la refracción atmosférica.

Orientación externa. Mediante la *orientación externa* se sitúa cada haz proyectivo en su posición correcta en el espacio, formando el modelo estereoscópico a escala del terreno original. La orientación externa queda definida por seis parámetros:

- La coordenadas X, Y y Z del punto nadiral del fotograma.
- Los ángulos de giro en cada una de las tres direcciones del espacio, ω , φ y κ , de la cámara en el momento de la toma.

La orientación externa tiene dos fases: *orientación relativa* y *orientación absoluta*.

Orientación relativa. La primera etapa de la orientación externa se denomina orientación relativa y consiste en situar ambos haces proyectivos en la misma posición relativa que ocupaban los haces proyectivos originales. De esta forma, los dos fotogramas ocuparán, uno respecto al otro, posiciones semejantes a las que ocupaban los negativos cuando se efectua-

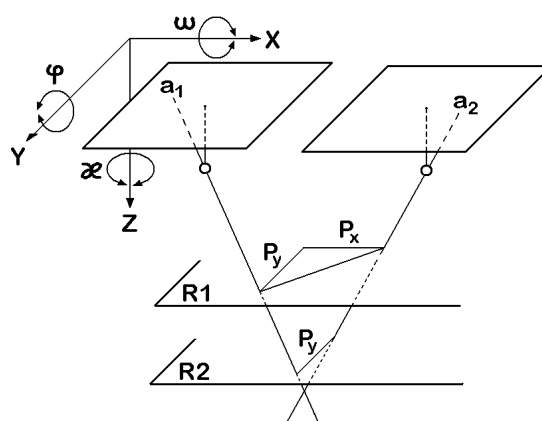


Fig. 20.12. Orientación relativa: paralajes

ron las tomas.

Una vez realizada la orientación relativa el modelo estereoscópico está formado y puede ser observado pero ni su situación en el espacio ni su escala son las correctas.

En equipos analógicos esta fase de la orientación se realiza eliminando paralajes P_y en cinco puntos representativos comunes a ambos fotogramas, más un sexto punto de control (figura 20.12). Como hemos visto, se llama paralaje al desplazamiento de la imagen de un punto en dos fotogramas sucesivos causado por el cambio de posición de la cámara de una toma a otra. El vector paralaje tiene dos componentes, tal como se aprecia en la figura 20.12: según la dirección del vuelo (que llamamos dirección X) y según la transversal (dirección Y). La paralaje P_x se anula colocando el plano de referencia R en la posición que correspondería al punto A del terreno (en la figura, la posición $R2$); la paralaje P_y es la que debe eliminarse durante la etapa de orientación relativa.

Para asegurar que cada par de rayos homólogos se corta en un punto, se demuestra en Geometría Proyectiva que basta con que lo hagan cinco de ellos. En consecuencia, para conseguir la orientación relativa deberían emplearse cinco puntos. Lo normal es utilizar seis o más puntos, bien repartidos por la zona común de ambos fotogramas (figura 20.13).

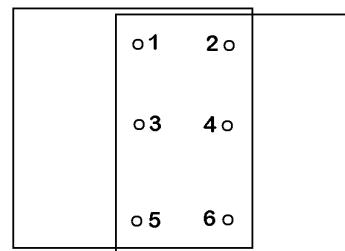


Fig. 20.13. Distribución aproximada de los puntos

La operación se realiza colocando los fotogramas en dos proyectores, eligiendo los seis puntos y eliminando paralajes de forma sistemática hasta conseguir que no queden paralajes P_y en ninguno de los seis puntos y, por tanto, en ningún punto del modelo. Para eliminar paralajes se actúa sobre cinco de los seis posibles movimientos en el espacio, tres lineales y tres angulares:

- b_x : Desplazamiento en el sentido de las X . Esta dirección es la definida por la recta que une los dos centros de proyección (en fotogrametría aérea, la dirección del vuelo).
- b_y : Desplazamiento en el sentido de las Y (transversal).
- b_z : Desplazamiento en el sentido de las Z (vertical).
- Giro en torno al eje X (ω).
- Giro en torno al eje Y (φ).
- Giro en torno al eje Z (α).

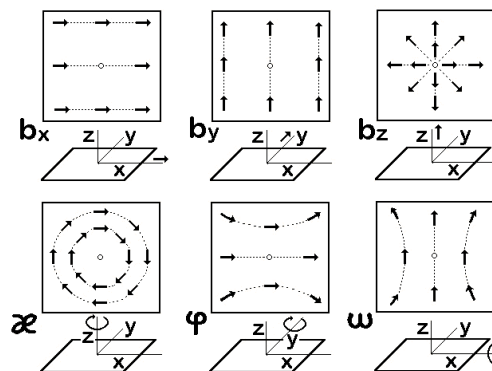


Fig. 20.14. Orientación relativa: los seis movimientos posibles

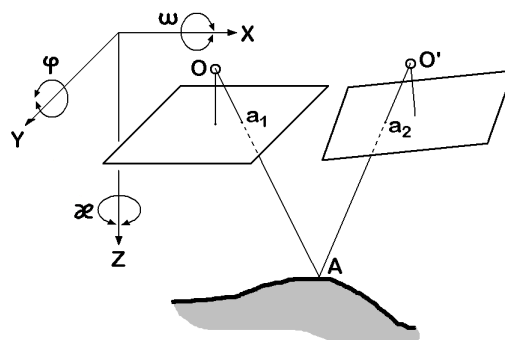


Fig. 20.15. Orientación relativa: los tres giros posibles

En la figura 20.14 se aprecia el efecto

provocado por cada uno de estos seis movimientos. En equipos analíticos y digitales la operación suele realizarse mediante un ajuste iterativo por mínimos cuadrados, imponiendo la condición de coplanariedad o la de colinearidad. La primera establece que un punto dado A del terreno, sus dos puntos homólogos a_1 y a_2 y los dos centros de proyección O y O' deben estar en un mismo plano. La segunda establece que un punto del terreno A , su punto imagen en una fotografía a_1 y el centro de proyección correspondiente O deben estar alineados.

Orientación absoluta. Puntos de apoyo. Una vez creado el modelo estereoscópico por intersección de los dos haces de rayos proyectivos (orientación relativa) es preciso situar dicho modelo, o lo que es lo mismo el bloque formado por los dos haces, en posición correcta con relación al terreno (figura 20.16).

Para ello se necesita conocer, al menos, las coordenadas terreno X , Y y Z de dos puntos del terreno y la coordenada Z de un tercero. Estos puntos, llamados puntos de apoyo, deben aparecer en ambos fotogramas, estar claramente identificados y bien repartidos por toda la zona afectada y no estar alineados. Normalmente, para disponer de información redundante que permita afinar más y comprobar posibles errores, se miden por topografía clásica las coordenadas de, al menos, cuatro puntos de apoyo del terreno a restituir.

La primera operación a realizar es el *ajuste en escala*, para la cual es necesario conocer, al menos, la distancia entre dos de los puntos de apoyo

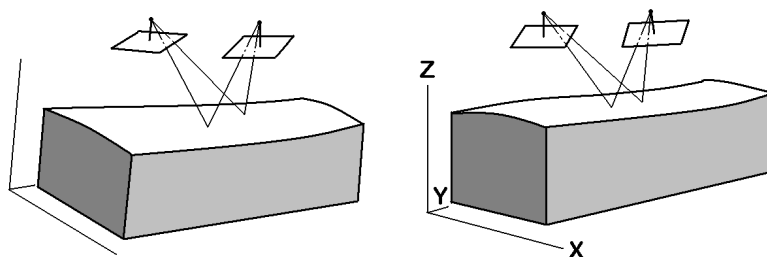


Fig. 20.16. Orientación absoluta

obtenida a partir de sus coordenadas planimétricas. La escala se ajusta por movimiento de los proyectores en la dirección X , lo que no introduce paralajes P_y y no altera, por tanto, la orientación relativa.

La segunda operación consiste en ajustar el modelo hasta lograr su perfecta *nivelación*. Para ello se necesita conocer las coordenadas Z de, al menos, tres puntos no alineados del terreno. Esta fase se consigue actuando sobre los movimientos de giro sobre los ejes X e Y de los dos proyectores simultáneamente, de forma que la orientación relativa no sufre alteraciones.

Los equipos analíticos y digitales permiten resolver numéricamente y de forma conjunta las dos etapas de la orientación externa. Se pasa así directamente del sistema de coordenadas fotografía al sistema de coordenadas terreno sin pasar por el sistema de coordenadas modelo.

20.3.2.- Puntos de apoyo. Concepto de aerotriangulación. GNSS aerotransportado

Uno de los principales inconvenientes de la fotogrametría radica en la necesidad de levantar una serie de puntos de apoyo mediante topografía clásica, lo que

complica y encarece la operación. La fotogrametría no ha podido independizarse de la topografía tradicional, aunque sí se ha podido reducir el número de puntos de apoyo necesarios utilizando la técnica denominada *triangulación aérea* o *aerotriangulación*.

Consiste esta técnica en obtener gran parte de los puntos de apoyo por procedimientos fotogramétricos, reduciendo así el número de los que es necesario levantar topográficamente.

La aerotriangulación consiste en la obtención de las coordenadas X, Y y Z de puntos que aparecen en cada par fotogramétrico ya orientado para emplearlos como nuevos puntos de apoyo en los pares posteriores de una pasada. Existen distintos procedimientos para aplicarla y, en general, los equipos analíticos y digitales disponen de software que permite realizar conjuntamente los cálculos, el ajuste y la compensación de cada pasada del vuelo.

En los últimos años se han producido avances significativos en estas técnicas gracias a la incorporación de sistemas GNSS aerotransportados y sensores inerciales. Estos sistemas, instalados en el avión fotogramétrico, permiten determinar los parámetros de la orientación externa (normalmente las coordenadas del centro de proyección) con precisión decimétrica mediante observación cinemática relativa respecto a una estación fija en tierra. Las coordenadas medidas por el equipo GNSS se introducen en el ajuste de cada pasada.

20.4.- EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN

20.4.1.- Instrumentos empleados

Las cámaras de fotogrametría aérea se sitúan generalmente en el fondo del avión. Se trata de cámaras especiales, perfectamente calibradas y que utilizan sistemas neumáticos para garantizar que el negativo está completamente plano en el momento de la toma. Los movimientos de la película, la secuencia de disparos de la cámara, etc., están automatizados.

La distancia focal y el campo de imagen en una cámara están relacionados. Pueden darse los siguientes casos:

	CAMPO (α)	FOCAL
Ángulo pequeño	60º	30 mm
Ángulo normal	80º	200mm
Gran angular	90º	150mm
Súper gran angular	120º	88mm

En fotogrametría aérea suelen emplearse objetivos granangulares.

Las cámaras clásicas para fotogrametría terrestre se montan sobre un teodolito o lo llevan incorporado en su estructura. De esta forma, los parámetros de la orientación externa se pueden determinar en el momento de la toma de los fotogramas. No obstante, es práctica habitual en la fotogrametría terrestre, como en la aérea, el

empleo de puntos de apoyo lo que permite realizar la orientación con mayor precisión. En consecuencia, se están empleando cámaras mucho más sencillas, baratas y manejables, con la única condición de que se haya efectuado un calibrado cuidadoso previo de las mismas. Los parámetros de calibrado de cada cámara pueden introducirse en el ordenador y ser tenidos en cuenta a la hora de realizar una restitución analítica, eliminando los correspondientes errores.

Los sistemas de toma más modernos son los constituidos por sensores, que proporcionan directamente imágenes digitales. También es posible obtener este tipo de imágenes a partir de fotogramas mediante un escáner de alta resolución. Las imágenes digitales son la base de la fotogrametría digital y permiten obtener mejores resultados y automatizar procesos repetitivos.

Los restituidores automáticos (como el *WILD A8* de la figura 20.17) permitían pasar de la proyección central a la ortogonal simulando físicamente la doble proyección central del par fotogramétrico orientado. Esta simulación podía efectuarse por procedimientos ópticos, mecánicos u óptico-mecánicos, lo que dio lugar a los distintos tipos de restituidores automáticos. En todos los casos se trataba de instrumentos voluminosos y muy complicados desde el punto de vista de su fabricación y su mantenimiento. Presentaban además una serie de limitaciones mecánicas y la imposibilidad de integrarse adecuadamente en sistemas de trabajo topográfico y fotogramétrico informatizado. Eran, además, equipos muy caros.

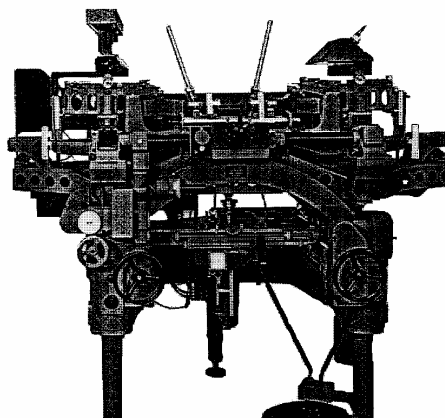


Fig. 20.17. Restituidor Wild A8

Los restituidores automáticos fueron sustituidos por los equipos analíticos, apoyados en un ordenador y mucho más sencillos desde el punto de vista mecánico. En ellos se emplean las técnicas de estereofotogrametría analítica y no las de simulación física: Todos los procesos se realizan a través del ordenador, que puede reconstruir la proyección central de forma totalmente numérica reproduciendo analíticamente las relaciones proyectivas entre los dos fotogramas. Por tanto, los movimientos de los sistemas de medición en equipos de este tipo, que deben corresponder a los movimientos en la proyección central que se pretende reconstruir, se calculan de forma analítica antes de enviar a los servomecanismos correspondientes las señales necesarias para ponerlos en práctica.

Los restituidores digitales, denominados estaciones fotogramétricas digitales (en la figura 20.18 el modelo *Delta* de Geosystem), se basan en un potente ordenador personal mediante el cual se realizan todas las funciones de los equipos clásicos,



Fig. 20.18. Estación fotogramétrica digital

pero de forma totalmente digital. Las dos imágenes digitales del par fotogramétrico, obtenidas mediante sensores o desde un escáner, se muestran simultáneamente en pantalla y el modelo estereoscópico se observa mediante anaglifos o luz polarizada. No se requieren sistemas ópticos o mecánicos ya que no es necesario desplazar físicamente los fotogramas al tratarse de imágenes digitales. Estos equipos están sustituyendo a los restituidores analíticos.

20.4.2.- Restitución de pares de fotogramas

Como se ha indicado, la restitución fotogramétrica consiste en la obtención de información métrica, mediante un equipo apropiado (un restituidor) a partir de un par de fotogramas previamente orientado en ese equipo. Las fases a seguir son:

1. Orientación interna: Formar los haces proyectivos a partir del conocimiento de los parámetros propios de la cámara.
2. Orientación relativa: Crear el modelo estereoscópico eliminando paralajes P_y .
3. Orientación absoluta: Con ayuda de los puntos de apoyo, situar correctamente el modelo en un sistema de coordenadas terreno y darle escala.
4. Restitución: Extraer información métrica del modelo.

La extracción de información se realiza a partir de la observación estereoscópica del modelo y con ayuda del índice móvil. En el caso de que se desee trazar curvas de nivel, basta con fijar la coordenada Z del índice móvil (o sea, su paralaje P_x) y moverlo sobre el modelo manteniéndolo posado. En otros casos se prefiere restituir por perfiles, fijando las coordenadas X o Y del índice.

El resultado de la restitución depende del tipo de restituidor que se emplee: en equipos antiguos se dibujaba directamente el plano o mapa con una mesa de dibujo o plotter, en los modernos equipos apoyados en un ordenador se almacenan los datos numéricos (coordenadas terreno) en soporte magnético para explotarlos posteriormente. Como se ha indicado, el empleo de restituidores de este tipo permite introducir una serie de correcciones que el ordenador aplicará a las coordenadas terreno calculadas. Es habitual considerar la corrección por curvatura terrestre y, en general, puede incluirse cualquier tipo de corrección que pueda ser expresada mediante ecuaciones.

Las estaciones fotogramétricas digitales incorporan módulos que permiten generar automáticamente modelos digitales de elevaciones (MDE).

20.4.3.- Automatización de procesos

El avance más relevante dentro de la fotogrametría digital es el constituido por la correlación automática de imágenes digitales ya que permite automatizar procesos, especialmente la obtención del modelo digital del terreno.

Si disponemos de un par de imágenes orientado, para determinar las coordenadas terreno de un punto de una imagen es suficiente con identificar su

homólogo en la otra imagen del par. Esta tarea de identificación de puntos la realiza el operador del restituidor de una forma intuitiva pero es la que más tiempo consume en el proceso de restitución. Para automatizarla se emplean algoritmos de correlación, que realizan la comparación de una pequeña ventana (zona alrededor del punto considerado) en una imagen digital con las distintas posiciones posibles del punto homólogo en la otra imagen. Habitualmente se emplean dos o más algoritmos distintos para eliminar errores en la identificación de puntos homólogos.

El barrido sistemático del modelo, realizado por el ordenador, permitirá identificar los homólogos de una serie de puntos distribuidos regularmente. Se determinan así las coordenadas X, Y y Z de los puntos y se genera el modelo digital del terreno.

20.4.4.- Concepto de ortoproyección

La finalidad de la ortoproyección es la obtención de fotogramas métricos, es decir fotogramas que conserven las relaciones métricas de la figura original y cuya escala sea correcta y conocida. Se trata de transformar la proyección central fotográfica en una proyección ortogonal eliminando las deformaciones de la imagen propias de la primera. Un fotograma de este tipo complementa perfectamente a un plano ya que presenta una planimetría sin errores y además conserva todos los detalles de la fotografía, eliminando cualquier interpretación errónea por parte del usuario.

Entendemos por rectificación el proceso de transformación de una fotografía normal, con los errores propios de la proyección central que ya conocemos, en una fotografía métrica. El término ha quedado reducido a aquellas transformaciones que corrigen únicamente el error de inclinación de la cámara y no los debidos a la forma del objeto fotografiado. Debido a la superposición en cada zona del fotograma de deformaciones de diversa índole (y básicamente debido a las deformaciones por relieve) la ortoproyección debe realizarse de forma diferencial, es decir con parámetros distintos para cada pequeña zona de la foto. En la práctica esto se realiza de forma automática con equipos conectados a ordenadores.

En este caso ya no basta con cuatro puntos de apoyo para ligar el par fotogramétrico al terreno si no que es preciso crear un modelo digital del terreno objeto de la ortoproyección. A partir de este modelo el ordenador calcula los parámetros de la ortoproyección en cada pequeña zona del fotograma. Para obtener el modelo digital puede realizarse una restitución analítica a base de perfiles paralelos y equidistantes, aunque con el software adecuado es posible crearlo con otros procedimientos.

Un ortoprojector clásico consiste, básicamente, en una base para situar la nueva emulsión a impresionar (normalmente un cilindro móvil), un zoom para los cambios de escala diferenciales y una serie de prismas que permiten el giro de la imagen en cualquier sentido. Todos los movimientos están dirigidos por el ordenador en base a los cálculos realizados a partir del modelo digital. El ordenador calculará, para cada pequeña parte del negativo, las operaciones a realizar para anular las deformaciones

propias de la proyección central. De esta forma, cada parte del negativo original se proyecta de nuevo hasta obtener otro negativo exento de errores.

Con imágenes digitales el proceso se limita a una reasignación de colores a cada elemento (píxel) de la nueva imagen a partir de los cambios de posición que se hayan determinado para los elementos de la imagen original.

Sobre una ortofoto no podemos observar estereoscópicamente el relieve al no disponer de su pareja estereoscópica. En caso necesario, puede crearse una pareja artificial utilizando los mismos procedimientos antes descritos. Naturalmente, esta segunda fotografía no es métrica y su única finalidad es la de permitir la formación y observación del modelo estereoscópico.

Por otra parte, la información contenida en una ortofoto es únicamente planimétrica por lo que con frecuencia interesa completarla con curvas de nivel, cotas, etc. Estos datos complementarios pueden incorporarse a la ortofoto o ir dibujados en un plano aparte, que se superpone a la ortofoto cuando sea necesario. La información altimétrica puede obtenerse del modelo digital del terreno.

Entre las aplicaciones de las ortofotos podemos mencionar:

- Conservación y restauración de objetos artísticos y monumentos.
- Fotointerpretación, por ejemplo en Geología. La gran ventaja de las ortofotos es que se puede medir sobre ellas, lo que facilita cualquier trabajo.
- Parcelación y catastro. Parece una de las aplicaciones más interesantes de la ortoproyección.
- Fotomapas de zonas urbanas donde la restitución tradicional resulta complicada y tediosa.
- Medio ambiente, restauración de terrenos, etc.
- Levantamiento fotogramétrico de zonas de gran vegetación, difícil de realizar por procedimientos clásicos.

20.5.- LEVANTAMIENTOS POR FOTOGAMETRÍA TERRESTRE

En fotogrametría terrestre se emplean, como sabemos, fotogramas tomados desde el suelo. La dirección de la toma será, en general, horizontal aunque en algunos casos interesen direcciones de toma oblicuas o verticales.

La longitud de la base, es decir la distancia entre los dos puntos de toma de un par de fotogramas, es un parámetro fundamental para determinar la precisión de las mediciones a efectuar en fotogrametría terrestre. En teoría, interesa que esta distancia sea mínima ya que así, si las dos direcciones de toma son paralelas, la zona común a los dos fotogramas será máxima; no olvidemos que

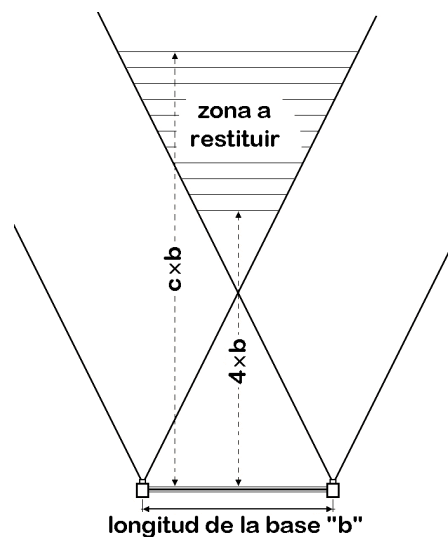


Fig. 20.19. Fotogrametría terrestre

solamente esta zona común puede ser restituida fotogramétricamente. En la práctica, esta distancia debe mantenerse entre ciertos límites para evitar que la precisión de las mediciones se vea afectada, pero también para conseguir un efecto estereoscópico adecuado.

Si llamamos $Y_{máx}$ e $Y_{mín}$ a las distancias máxima y mínima entre los puntos de la zona a restituir y los puntos de la base, se admite para fotogrametría terrestre que la longitud de la base b debe cumplir (figura 20.19):

$$\frac{Y_{mín}}{4} > b > \frac{Y_{máx}}{c}$$

siendo c la distancia focal de la cámara empleada expresada en centímetros.

La elección de las zonas donde van a establecerse las bases fotogramétricas debe hacerse teniendo en cuenta estos detalles. Para conseguir un nivel de precisión uniforme en todas las zonas restituidas fotogramétricamente debemos procurar evitar que haya diferencias importantes entre las distancias de los puntos más próximos a las bases y los más lejanos. Esto puede conseguirse con una adecuada elección de la ubicación de las bases. En ocasiones nos veremos obligados a utilizar dos bases para restituir una misma zona, una para los puntos más próximos y otra para los más lejanos. Como puede apreciarse, la elección de la ubicación de las bases es la más delicada entre las tareas a efectuar en fotogrametría terrestre, ya que de ella dependen desde el número de bases que va a ser preciso emplear hasta la precisión que cabe esperar en las mediciones.

En fotogrametría terrestre suele ser fácil determinar la situación exacta de la cámara y la dirección de toma de las fotografías, por lo que, en principio, se podría realizar la orientación sin necesidad de puntos de apoyo. Sin embargo, tanto en la toma de fotografías como en la restitución fotogramétrica se produce una serie de errores cuya eliminación es difícil si no se recurre a los puntos de apoyo. Por tanto, su empleo en fotogrametría terrestre es una práctica habitual y, desde luego, muy recomendable.

Los puntos de apoyo deben distribuirse por toda la zona a restituir y sus coordenadas se determinarán desde los puntos de la base cada vez que vayamos a tomar un nuevo par de fotogramas. En ocasiones, es preciso emplear otros sistemas como una serie de escalas graduadas que se sitúan sobre la zona a fotografiar. Tal es el caso de las aplicaciones en medicina, balística, etc., en los que se trabaja sobre objetos de tamaño muy reducido.

20.6.- LEVANTAMIENTOS POR FOTOGRAMETRÍA AÉREA

La fotogrametría aérea constituye el procedimiento más importante para la obtención de planos y mapas a cualquier escala. Un trabajo de este tipo parte de la realización de un vuelo fotogramétrico, que será llevado a cabo por alguna de las empresas u organismos especializados existentes en nuestro país.

A partir del vuelo se realiza la restitución fotogramétrica. Si disponemos del instrumental fotogramétrico necesario podremos acometer nosotros mismos esta etapa; de lo contrario, la restitución será realizada por una empresa especializada, la misma que realizó el vuelo fotogramétrico u otra distinta. En cualquiera de los casos, la elección de muchos de los parámetros del vuelo fotogramétrico dependerá del uso final que se vaya a dar a los planos o mapas obtenidos del trabajo fotogramétrico. Esta elección es responsabilidad, por tanto, del usuario final de dichos planos o mapas.

El primer punto a considerar, como sucede en todo trabajo topográfico, es la escala de los planos o mapas que van a obtenerse a partir del trabajo fotogramétrico. Esta escala nos va a determinar algunos de los parámetros más importantes del vuelo, que están directamente relacionados con ella. Asimismo, para una superficie de terreno dada los costes del trabajo fotogramétrico van a depender, en buena medida, de la escala a la que trabajemos.

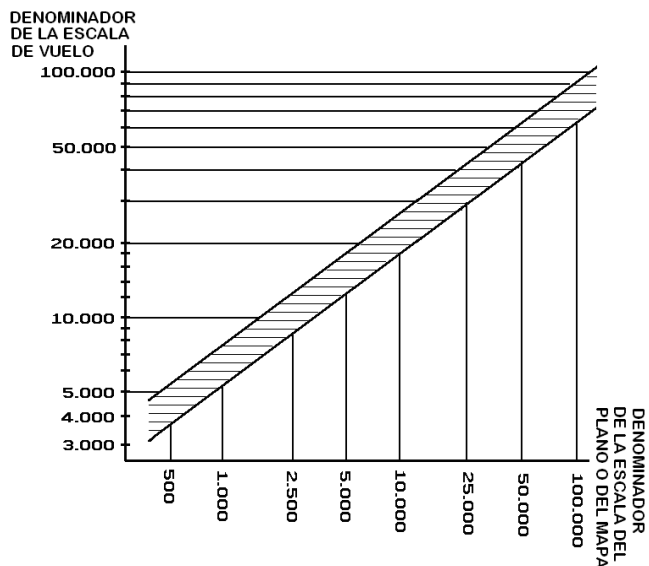


Fig. 20.20. Escala de vuelo y escala de mapa/plano

Para que los errores propios del trabajo fotogramétrico se mantengan dentro de límites aceptables, la escala de los planos o mapas a obtener y la de las imágenes fotogramétricas (fotogramas) deben mantener una cierta relación. En la figura 20.20, entrando con el denominador de la escala de los mapas o planos, obtenemos los valores máximo y mínimo del denominador de la escala de los fotogramas a emplear. Por ejemplo, para obtener un plano a escala 1:1000 la escala del vuelo puede oscilar entre 1:6.000 y 1:8.000, aproximadamente. La relación entre la escala del plano o mapa y la del vuelo también puede obtenerse de la expresión:

$$E_v = 200 \sqrt{E_p}$$

siendo E_v y E_p los denominadores de las escalas de vuelo y de plano, respectivamente.

Naturalmente, existen diferencias entre trabajar con fotogramas a una escala u otra. Para una escala de plano dada, cuanto mayor sea la escala del vuelo menores serán los errores. Por otro lado, cuanto menor sea la escala del vuelo menor será el número de fotogramas necesarios para cubrir una superficie de terreno dada, lo que supone menores costes de restitución fotogramétrica. Dentro de los límites que nos marca la figura 20.20 elegiremos la escala de vuelo según nuestras necesidades.

Para una escala de vuelo dada, el coste del vuelo fotogramétrico aumentará con la superficie de terreno a cubrir y, por tanto, con el número de fotogramas necesario, pero no de forma proporcional. En efecto, una parte de los costes del vuelo puede considerarse fija: puesta en marcha del vuelo, solicitud de permisos, etc. El resto de los

costes será variable y, en una primera aproximación, proporcional al número de fotografías: combustible del avión, material fotográfico, etc.

El coste de la etapa de restitución sí puede considerarse proporcional al número de fotografías, ya que, en principio, el coste por cada par restituído será aproximadamente el mismo. Puesto que el tamaño de los fotografías es fijo, 23x23cm, el número de fotografías necesario para cubrir una superficie de terreno dada será inversamente proporcional al cuadrado del denominador de la escala de dichos fotografías. En consecuencia, el vuelo debe planificarse de forma que el número de fotografías sea el menor posible, siempre teniendo en cuenta las limitaciones relacionadas con la calidad del resultado a obtener y, en particular, con la precisión del mismo.

20.6.1.- Altura de vuelo

La altura de vuelo, o altura a la que debe volar el avión que realiza el vuelo fotogramétrico (figura 20.21), viene determinada por la escala del vuelo. La escala del vuelo es igual al cociente entre la distancia focal de la cámara fotogramétrica d y la altura de vuelo H . Por tanto, una vez fijada la escala del vuelo, la altura de vuelo debe ser:

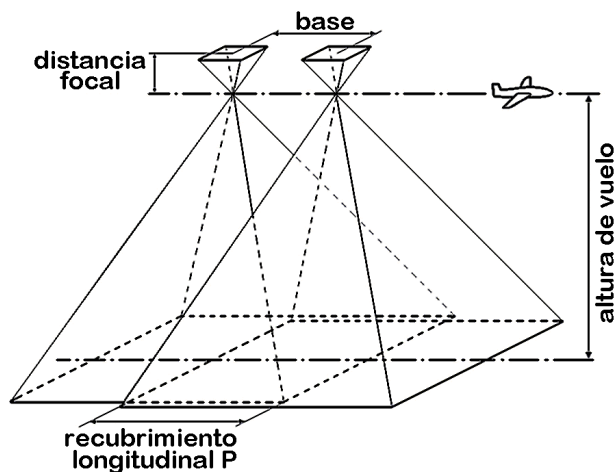


Fig. 20.21. Parámetros del vuelo fotogramétrico

$$H = \frac{d}{1 : E_v} = d E_v$$

siendo E_v el denominador de la escala del vuelo.

En la práctica resulta imposible mantener una altura de vuelo perfectamente constante a lo largo de toda la sesión de toma de fotografías. Esto supone que la escala del vuelo va a cambiar de unos lugares a otros, especialmente si la topografía de la zona es bastante variable. Ya hemos indicado que en fotogrametría no se puede hablar más que de una escala media, ya que por estas y otras razones las distintas zonas de un fotograma tendrán escalas diferentes.

Estas variaciones, siempre que no sean excesivas, no suponen ningún problema práctico. A título indicativo pueden admitirse tolerancias del orden de un 10% en la altura del vuelo.

20.6.2.- Recubrimientos, base y distancia entre pasadas

Se conoce como *recubrimiento* el solape entre cada dos fotografías consecutivas, es decir la zona de terreno que aparece a la vez en ambas fotografías. La finalidad del vuelo fotogramétrico es la obtención de pares de fotografías estereoscópicas. La visión estereoscópica sobre cada par de fotografías consecutivas se

limita a la zona de terreno común a los dos. Por tanto, el recubrimiento mínimo necesario para que cualquier zona del terreno a restituir aparezca en dos fotogramas consecutivos sería del 50% de la superficie de cada fotograma.

En la práctica es habitual utilizar un *recubrimiento longitudinal P* del 60%. El recubrimiento longitudinal es el solape entre fotogramas consecutivos en la dirección en que se mueve el avión. Con este valor tendremos la garantía de que pequeñas variaciones en la dirección de la toma o en la altura de vuelo no van a provocar que algunas zonas del terreno sean cubiertas por un solo fotograma y no puedan ser restituidas.

En la figura 20.22 se indican algunas posibles causas de que el recubrimiento entre dos fotogramas consecutivos sea insuficiente: inclinación excesiva de una de las dos tomas, variación brusca en la altura de vuelo, cambio brusco en el relieve. En el caso de que alguna zona del terreno a levantar fotogramáticamente no quedase cubierta por dos fotogramas nos veríamos obligados a levantarla por procedimientos topográficos clásicos, o a efectuar un nuevo vuelo limitado a esa zona.

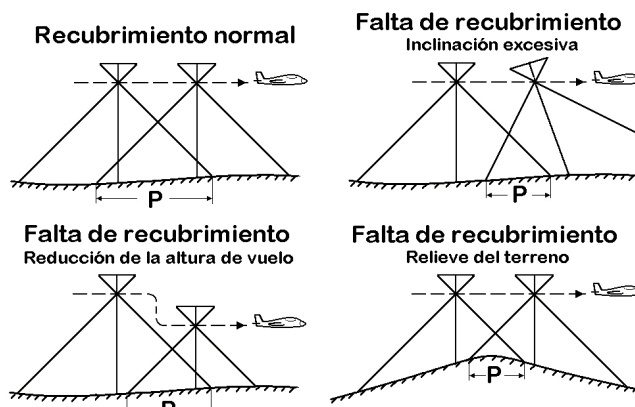


Fig. 20.22. Falta de recubrimiento en un par fotogramétrico

Normalmente, la zona de terreno a fotografiar es bastante ancha y no puede ser cubierta de una sola vez, por lo que se hace necesario realizar varias pasadas con trayectorias paralelas entre sí (figura 20.23). El solape entre cada dos pasadas consecutivas se conoce con el nombre de *recubrimiento transversal Q*. Habitualmente se trabaja con recubrimientos transversales entre el 20 y el 30%. Las consideraciones que se han hecho al referirnos al recubrimiento longitudinal son válidas para el transversal. La falta de recubrimiento entre dos pasadas sucesivas supone que alguna zona de terreno no aparecerá en ninguno de los pares correspondientes a cada una de las pasadas y, por tanto, no podrá ser restituida.

Base es la distancia que debe recorrer el avión entre cada dos disparos consecutivos de la cámara fotogramétrica. Normalmente, estas cámaras disponen de mecanismos programables para realizar estas operaciones de forma automática.

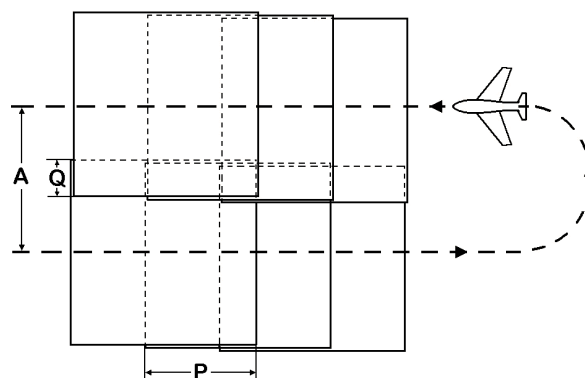


Fig. 20.23. Recubrimiento trasversal; distancia entre pasadas

Si denominamos S a la distancia en el terreno correspondiente a la longitud del lado del fotograma ($S'=23cm$), tendremos:

$$S = \frac{S'}{\text{escala de vuelo}} = \frac{S'}{1 : E_v} = S' E_v$$

La base B vendrá dada por la expresión:

$$B = S \left(1 - \frac{P}{100}\right)$$

siendo P el recubrimiento longitudinal expresado en tanto por ciento. En efecto, para que el solape entre fotografías consecutivas sea del $P\%$ la distancia entre tomas ha de ser el $(100-P)\%$ de la longitud S . De igual modo, la distancia A entre dos pasadas consecutivas del avión se determina a partir del recubrimiento transversal Q (figura 20.23):

$$A = S \left(1 - \frac{Q}{100}\right)$$

20.6.3.- Plan de vuelo. Geometría del vuelo. Limitaciones a considerar

Una vez elegidos los parámetros del vuelo procederemos a establecer el plan del mismo y a determinar el número aproximado de fotografías necesario, para poder realizar una estimación de los costes del trabajo fotogramétrico. Además de esto, a la hora de realizar el vuelo fotogramétrico habrá que tener en cuenta otros detalles que van a influir en la calidad de los fotogramas, tales como existencia de nubosidad, posición del Sol, etc.

Siempre que sea posible, la dirección del vuelo debe elegirse de forma que se minimice el número de fotografías necesario para cubrir totalmente el terreno a restituir. En efecto, si este terreno tiene una forma rectangular lo más conveniente será que la dirección del vuelo sea paralela al lado mayor del rectángulo. De esta manera resulta más sencillo adaptar las pasadas del avión a la forma del terreno y se reducirán las zonas exteriores que aparezcan en los fotogramas. Además, la misma superficie se podrá cubrir con un menor número de pares lo que supondrá menos costes tanto en el vuelo como en la restitución.

No olvidemos que para evitar que queden zonas del terreno no cubiertas por ningún par de fotografías es necesario que la primera y la última pasadas sobresalgan ligeramente del área a restituir. Del mismo modo, el primer y el último par de cada pasada deberán exceder ligeramente los límites de la zona de interés.

Para estimar el número de pares fotogramétricos necesarios para un trabajo determinado consideraremos que la superficie de terreno cubierta por cada fotograma será $S \cdot S = S^2$.

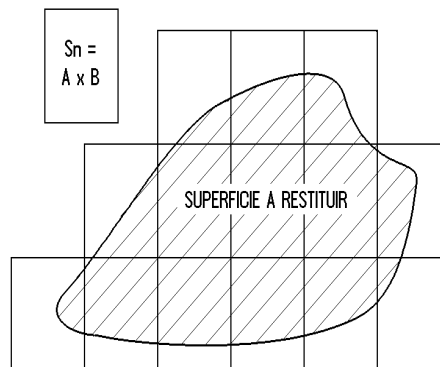


Fig. 20.24. Estimación del número de pares necesario

Puesto que cada dos fotografías consecutivas se solapan un $P\%$ y cada dos pasadas consecutivas del avión se solapan un $Q\%$, la superficie estereoscópica a restituir en cada par de fotografías será:

$$S_n = S^2 \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(1 - \frac{Q}{100}\right) = A B$$

Por consiguiente, el número n de fotografías necesario para cubrir una superficie de terreno S_a sería, teóricamente: $n = S_a/S_n$. En la práctica el número de fotografías n puede ser considerablemente mayor, ya que es imposible conseguir que las distintas pasadas del avión se adapten exactamente a la forma del terreno a restituir, especialmente si ésta es muy irregular como la de la figura 20.24. En función de la forma del terreno, de su tamaño y de la escala del vuelo, las zonas exteriores que aparezcan en los fotografías, y que no interesa restituir, pueden ser más o menos importantes. Con el fin de tener una idea aproximada del número de pares necesario y, por tanto, de los costes implicados en el trabajo fotogramétrico, incrementaremos el valor de n en una proporción que puede oscilar entre el 10 y el 30%.

Durante el vuelo, y debido a turbulencias atmosféricas y a otras causas, es imposible conseguir que la alineación de cada pasada sea perfecta y que la dirección de toma sea totalmente vertical. Los fotografías se verán afectados por inclinaciones variables de la cámara en las tres direcciones del espacio: longitudinal, transversal y vertical. Estas inclinaciones se corrigen durante la etapa de orientación de cada par fotogramétrico. Algunos equipos fotogramétricos presentan limitaciones de tipo mecánico, que imposibilitan la orientación si las inclinaciones de la cámara son excesivas. Es preciso conocer las características del equipo de restitución que se va a emplear y marcar unas tolerancias a la hora de encargar el vuelo fotogramétrico.

21. TELEDETECCION

21.1.- INTRODUCCIÓN. CONCEPTO DE TELEDETECCIÓN

Llamamos *Teledetección* al conjunto de técnicas que permiten el estudio de ciertas características de la superficie terrestre, o de fenómenos que le afectan, a partir de medidas efectuadas a distancia, de forma que el equipo receptor de la información no entra en contacto directo con la zona a estudiar. El término engloba no solo las técnicas de obtención de información, sino también las que permiten el procesamiento posterior de dicha información. Tanto por la diversidad de procesos que utiliza como por el amplio rango de aplicaciones prácticas que cubre, supone la formación de equipos multidisciplinares, compuestos por técnicos de distintas especialidades.

Los países anglosajones utilizan los términos "Remote Sensing" para referirse a estas técnicas, incluyendo sensores que no tienen por qué situarse en el espacio. El término en castellano procede del que se usa en Francia "Teledetection" y se aplica para sensores espaciales.

La teledetección supone una forma nueva de estudiar la superficie de la Tierra y la atmósfera, aprovechando las ventajas de una visión global desde el espacio. Una de sus mayores aportaciones es la dimensión temporal de la información que genera. En efecto, las órbitas de los satélites están calculadas de forma que repitan su trayectoria en torno a la Tierra, pasando cada vez sobre los mismos puntos. De esta forma, en cada zona de la Tierra se dispone de imágenes nuevas cada poco tiempo, lo que permite estudiar la evolución temporal de los fenómenos de interés.

Al no existir contacto directo entre el objeto estudiado y el sensor que recoge la información, es necesaria la intervención de un elemento intermedio que sirva de transmisor de ésta. En teledetección se emplea la energía electromagnética, cuya interacción con la materia puede ser detectada. En fotogrametría el proceso es similar y los sensores empleados, cámaras fotogramétricas, permiten detectar la interacción de la materia con una parte del espectro electromagnético: la zona visible e infrarroja. En teledetección, dependiendo del sensor empleado, se explorarán unas u otras zonas del espectro.

21.2.- MÉTODOS EMPLEADOS

21.2.1.- Sistemas activos y sistemas pasivos

Muchos de los sensores empleados en teledetección no emiten energía electromagnética, sino que se limitan a captar la información generada por la interacción de la emitida por el Sol con la materia. Estos equipos registran la energía electromagnética reflejada, en distintas zonas del espectro electromagnético, por los

objetos que se pretende estudiar. Otros sensores trabajan en la banda térmica del espectro, registrando la energía electromagnética emitida, en esta banda, por dichos objetos. En ambos casos se trata de *sistemas pasivos*, que no emiten energía sino que aprovechan la energía emitida por el Sol o por los distintos elementos del terreno que se pretende estudiar.

Los sistemas que son a la vez emisores y receptores de energía electromagnética se denominan *sistemas activos*. Lo que interesa registrar en estos sistemas es la interacción con la materia de la energía que ellos mismos emiten.

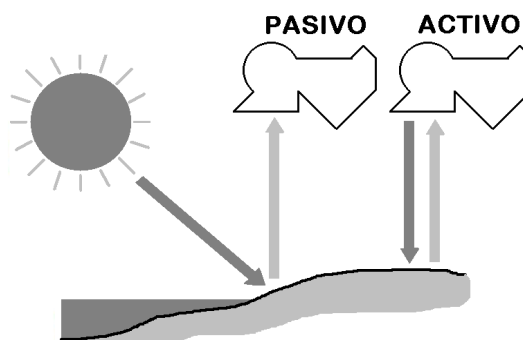


Fig. 21.1. Sistemas activos y sistemas pasivos

21.2.2.- Tipos de plataforma

En teledetección no existe contacto directo entre el receptor de la información y el objeto del estudio. Sin embargo la distancia entre ambos puede ser muy variable (desde algunos metros a miles de kilómetros), dependiendo del tipo de plataforma que transporta el sensor. En teledetección se emplean los siguientes tipos de plataformas:

- **Plataformas terrestres:** camiones, globos cautivos, etc.
- **Plataformas aéreas:** aviones, globos estratosféricos, etc.
- **Plataformas espaciales:** satélites espaciales.

Las primeras, empleadas para altitudes hasta unos *200m*, tienen aplicaciones muy limitadas; sin embargo, una de ellas es de gran importancia: la obtención de la verdad-terreno, de la que nos ocuparemos más adelante. Las plataformas aéreas tienen aplicación cuando se precise una gran resolución, es decir escalas de trabajo muy grandes, y la zona a estudiar sea de dimensiones reducidas.

Los satélites son de aplicación en la mayoría de los casos, siempre que se pueda trabajar con escalas pequeñas. Presentan dos ventajas importantes: la gran distancia de la plataforma a la Tierra permite una gran cobertura y, en consecuencia, una visión global de los fenómenos de interés; además, al seguir órbitas fijas, cada cierto tiempo se repiten las tomas sobre los mismos puntos, permitiendo un seguimiento temporal del fenómeno en estudio que resulta vital para muchas aplicaciones.

21.3.- EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. ZONAS ÚTILES

21.3.1.- El espectro electromagnético

El Sol ilumina la Tierra con una radiación electromagnética cuya intensidad a lo largo del espectro se asemeja a la de un cuerpo negro a *6000K*. Esta energía interacciona con la materia, siendo reflejada o absorbida selectivamente con la frecuencia, tanto por los elementos situados en la superficie terrestre como por los distintos constituyentes de la atmósfera.

Del espectro total abarcado por la energía electromagnética -entre 10^{-10} y $10^{10} \mu\text{m}$ correspondientes respectivamente a los rayos cósmicos y a las ondas de TV y radio- interesa en teledetección la franja situada entre el comienzo de la *zona visible* ($0,35 \mu\text{m}$) y las *microondas* (hasta $10\text{cm} = 10^5 \mu\text{m}$). En la figura 21.2 se esquematiza el espectro electromagnético con sus distintas zonas y las denominaciones que reciben.

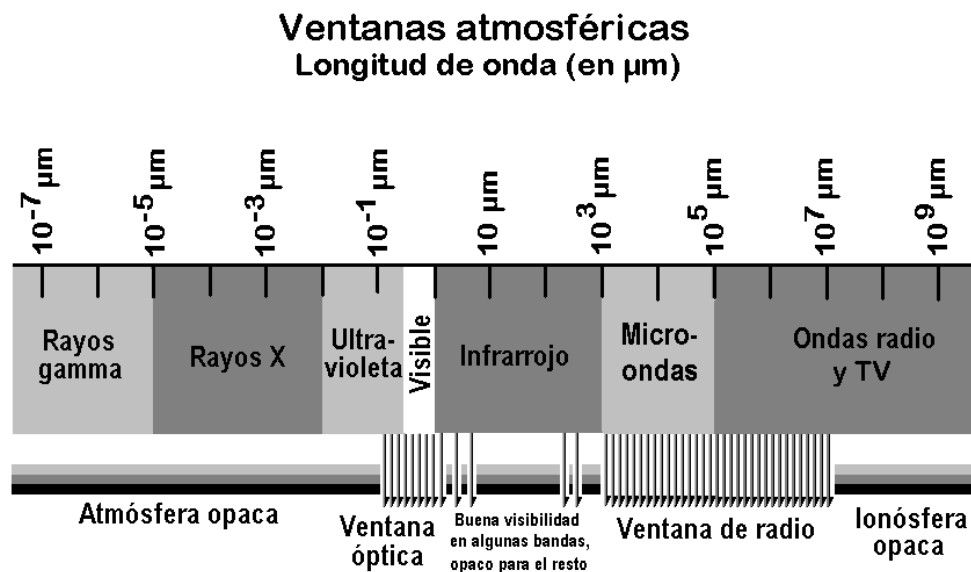


Fig. 21.2. El espectro electromagnético. Ventanas atmosféricas

La zona situada entre $0,35$ (visible) y $10^3 \mu\text{m}$ (infrarrojo térmico) es la empleada por los sistemas pasivos. El visible y el infrarrojo próximo se aplican con sensores que captan la radiación solar reflejada por la materia en ese rango de longitudes de onda. La zona del infrarrojo térmico es la utilizada por los sensores que captan la energía térmica emitida por la materia.

La zona entre $10^3 \mu\text{m}$ y 10cm (microondas) se emplea con los sistemas activos, que emiten radiación en esa banda de longitudes de onda y captan la energía reflejada por la materia en la misma banda.

21.3.2.- Zonas útiles para teledetección

Para las zonas del espectro correspondientes a las frecuencias más altas, rayos cósmicos y rayos X, la atmósfera resulta prácticamente impenetrable. La radiación de este tipo no llega apenas a la superficie terrestre y no puede, por tanto, ser empleada en teledetección. Para los rayos ultravioleta la atmósfera se comporta como una capa más o menos opaca, dependiendo de la cantidad de ozono que se encuentra en la estratosfera.

Para la zona visible del espectro el mayor inconveniente radica en la presencia de vapor de agua suspendido en la atmósfera. Es sabido que la radiación en la franja visible (que se emplea también en fotogrametría) no es capaz de atravesar las nubes, que caso de existir, dificultan o impiden la visión de la Tierra desde el espacio.

Para el infrarrojo próximo y el térmico existen bandas de buena visibilidad, en que la radiación atraviesa la atmósfera, pero hay otras en que los fenómenos provocados por la interacción de la radiación con los componentes de ésta la hacen opaca, no pudiendo ser empleadas en teledetección.

Finalmente, para la parte inferior del espectro la Tierra actúa como un cuerpo negro.

Los dos principales efectos negativos para teledetección que sufre la radiación al atravesar la atmósfera son la *dispersión* y la *absorción*. El primero provoca una difusión de la radiación directa causada por las moléculas gaseosas de la atmósfera. Debido al segundo la energía electromagnética es absorbida por los componentes de la atmósfera, impidiendo que se transmita y pueda ser captada. El resultado de estos dos efectos es una atenuación de la señal recibida, que puede ser tan importante en algunas de las bandas del espectro que hace que estas bandas sean inútiles para teledetección.

Por tanto, incluso en la franja situada entre $0,35\mu\text{m}$ y 10cm , apropiada en principio, solo algunas bandas de frecuencia son capaces de atravesar la atmósfera sin que la radiación resulte enmascarada, distorsionada o difuminada en un porcentaje importante. Estas bandas se denominan *ventanas atmosféricas* y son las únicas que pueden emplearse en teledetección.

Estas ventanas corresponden a las zonas del espectro en que el porcentaje de energía electromagnética transmitida es suficientemente importante para que pueda ser captada con claridad por un sensor.

21.3.3.- La radiación electromagnética

Tal como se muestra en forma esquemática en la figura 21.3, la radiación emitida por el Sol en dirección a la Tierra puede sufrir tres procesos distintos: una parte Φ_a será absorbida por la atmósfera, otra parte Φ_r sufrirá los procesos de dispersión y será devuelta en parte al espacio, otra parte Φ_t es transmitida por la atmósfera y alcanza la superficie terrestre. La energía recibida por el sensor corresponde a esa parte de energía transmitida por la atmósfera, pero también a la que sufre procesos de dispersión atmosférica y a la emitida por la Tierra o por los componentes de la atmósfera.

El proceso se complica si tenemos en cuenta que la radiación reflejada por la superficie terrestre va a sufrir los mismos procesos antes de llegar al sensor y poder ser registrada por él.

El *flujo* (Φ) de energía radiada por unidad de superficie se expresa en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Es preciso especificar si esta energía es emitida por la superficie o recibida por ella (in-

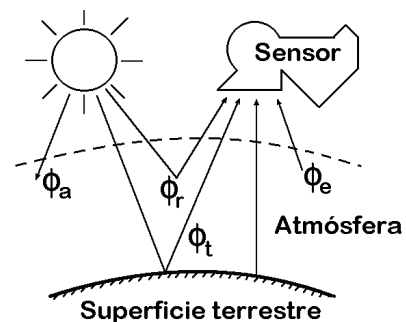


Fig. 21.3. Procesos que sufre la radiación emitida por el Sol

cidente). En el primer caso se habla de *emitancia* (M) y en el segundo de *irradiancia* (E). Se tiene:

$$E = M = \frac{d\Phi}{dS}$$

Se trata de conceptos semejantes, cuya única diferencia radica en el sentido de la radiación: emitida o incidente.

En el caso de superficies extensas, no puntuales, se define la *radiancia* L :

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dS \cos\psi}$$

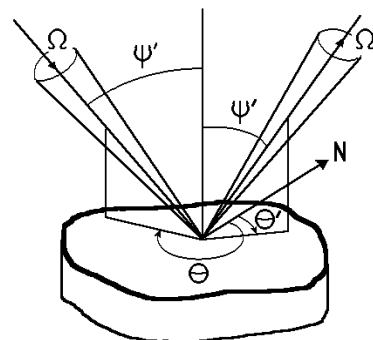


Fig. 21.4. Radiación incidente y reflejada

flujo radiativo emitido por una superficie elemental (dS), por unidad de ángulo sólido ($d\Omega$) y según una dirección determinada, que forma un ángulo ψ con la normal a la superficie.

Para caracterizar las propiedades reflectivas de una superficie se emplea la *función de distribución de reflectividad bidireccional*:

$$f(\theta, \psi, \theta', \psi') = \frac{dL'(\theta', \psi')}{dE(\theta, \psi)} \quad (W m^{-2})$$

donde los ángulos θ y ψ determinan la dirección de la radiación incidente (en acimut y distancia cenital) y θ' y ψ' la de la reflejada (figura 21.4). Siendo $L(\theta, \psi)$ la radiancia incidente bajo un ángulo sólido $d\Omega$, será:

$$dE(\theta, \psi) = L(\theta, \psi) \cos\theta \operatorname{sen}\theta d\theta d\psi$$

$$f(\theta, \psi, \theta', \psi') = \frac{dL'(\theta', \psi')}{L(\theta, \psi) \cos\theta \operatorname{sen}\theta d\theta d\psi}$$

Esta función de distribución, característica del comportamiento reflectivo de una superficie, es la función fundamental en teledetección.

21.4.- OBTENCIÓN Y TRANSMISIÓN DE DATOS

Los instrumentos que recogen la información procedente de la Tierra y de la atmósfera, en forma de energía electromagnética, se llaman *sensores*. Cada sensor trabaja en un determinado intervalo o intervalos de longitud de onda. Dependiendo de la aplicación que se quiera dar a los datos obtenidos por teledetección interesarán unas u otras bandas del espectro electromagnético, lo que nos llevará a elegir imágenes procedentes de sensores que trabajen en esas mismas bandas.

21.4.1.- Tipos de sensores

En teledetección se emplean los siguientes tipos de sensores:

- **Cámaras fotográficas y de televisión.**- Son sensores que operan en las zonas visible e infrarrojo próximo del espectro. Utilizando filtros o películas especia-

les, las fotografías pueden captar varias bandas espectrales simultáneamente (fotografía multiespectral). Las fotografías desde satélite presentan el inconveniente de la gran cantidad de espacio necesario para almacenar la película fotográfica y de la dificultad de enviarla a Tierra. Para evitarlo pueden emplearse cámaras VIDICON, capaces de formar una réplica de la imagen captada en soporte magnético, y no en emulsión química, que puede ser transmitida inmediatamente a Tierra, dejando espacio para la siguiente imagen.

- **Radiómetros.**- Los radiómetros reciben tanto la radiación emitida por el Sol como la reflejada por la Tierra. Estos dos tipos de radiación se separan mediante filtros o sistemas ópticos. Están dotados de *sistemas de barrido*, de forma que la información se obtiene a partir de bandas estrechas del terreno,

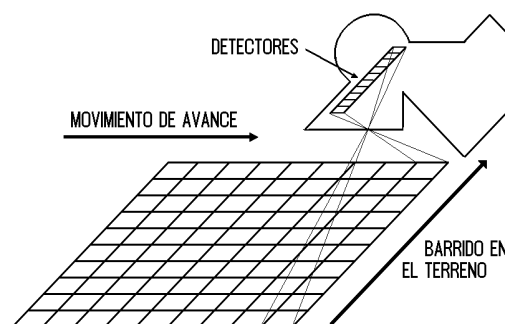


Fig. 21.5. Radiómetro

transversales al movimiento del satélite que lleva el sensor (figura 21.5). Cada una de estas bandas consta a su vez de una serie de informaciones, correspondiendo cada una de ellas a una visión instantánea del sensor.

Cada una de estas informaciones instantáneas puede descomponerse a su vez en diferentes bandas de frecuencia (tantas como sea capaz de captar el sensor), por lo que la imagen obtenida es en realidad una serie de imágenes, correspondiendo cada una a la respuesta del terreno a una banda de frecuencia determinada. Los radiómetros operan en las zonas visible a infrarrojo térmico del espectro electromagnético.

En fotogrametría aérea es posible corregir (durante la etapa de orientación) defectos en la estabilidad de la plataforma porta-sensor. Con un radiómetro, al estar cada imagen compuesta por una serie de informaciones puntuales, estos defectos de estabilidad no se pueden corregir más que disponiendo de un sistema de calibración en vuelo.

- **Radares.**- Los radares operan en la franja del espectro correspondiente a las microondas. Se trata de sistemas activos (emisores y receptores simultáneamente) por lo que no dependen de la radiación solar y pueden funcionar a cualquier hora del día. Por otro lado, la atmósfera es transparente a las microondas, por lo que estos sistemas no se encuentran limitados por las condiciones atmosféricas.

Se utilizan *radares laterales* (o *slar*), que generan las imágenes midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal; los *radares láser* (o *lidar*) operan en la banda ultravioleta a infrarrojo próximo y se

emplean para el estudio de partículas atmosféricas; los *radars altimétricos* permiten obtener medidas altimétricas muy precisas.

SATELITE	Lanzamiento		Agencia
	Fecha	Lugar	
SeaWiFS	01-ago-97		
TRMM	27-nov-97	Tanegashima	NASA/JAXA
Landsat 7	15-abr-99	Vandenberg	NASA
QuikSCAT	19-jun-99	Vandenberg	NASA/JPL
Terra	18-dic-99	Vandenberg	multiple
ACRIMSAT	20-dic-99	Vandenberg	NASA/JPL
NMP/EO-1	21-nov-00		NASA/Goddard
Jason 1	07-dic-01		NASA/CNES
Meteor 3M-1/Sage III	10-dic-01	Baikonur	
GRACE	17-mar-02		
Aqua	04-may-02	Vandenberg	MULTIPLE
ADEOS II (Midori II)	12-dic-02		
ICESat	12-dic-02	Vandenberg	NASA
SORCE	25-jun-03	Cape Canaveral	NASA
Aura	16-jul-04	Vandenberg	multiple
CloudSat	28-abr-06	Vandenberg	NASA
CALIPSO	28-abr-06	Vandenberg	NASA
Hydros	01-jun-06		
NPOESS	--		NASA/NOAA
OCO	23-feb-09		NASA/NOAA
Aquarius	10-jun-11	Vandenberg	NASA/CONAE

Fig. 21.6. Ejemplos de satélites y la agencia espacial responsable

21.4.2.- Satélites utilizados

Se distingue entre los satélites meteorológicos y los dedicados a recursos naturales. Además, dependiendo del tipo de órbita en torno a la Tierra que sigan, los satélites empleados en teledetección pueden ser:

- **Geoestacionarios.**- Se sitúan en órbitas ecuatoriales. Los satélites de este tipo acompañan a la Tierra en su movimiento de rotación, manteniéndose siempre sobre un punto determinado de la superficie terrestre. Su altura debe ser de *35.800km*, para que su período orbital sea igual al de rotación de la Tierra. Debido a su gran altura, su resolución espacial es pequeña: el lado del píxel representa de *2,5 a 5km* de la superficie terrestre.
- **Heliosíncronos.**- Siguen órbitas aproximadamente polares, calculadas de forma que el paso de cada órbita del satélite por un punto de la Tierra ocurre a la misma hora. De esta forma, el ángulo de iluminación del Sol permanece casi constante en pasadas sucesivas. Se sitúan a alturas entre *500 y 1.000km*, obteniendo resoluciones espaciales entre *30 y 800m*, según las prestaciones del sensor y la altura del satélite.

Las diferentes agencias espaciales ponen en órbita satélites con diversas funciones: militar, meteorológico, comunicaciones, astronómicos, observaciones variadas, etc. Los más utilizados en teledetección para analizar los recursos naturales son: LANDSAT, SPOT, ERS, ENVISAT, RESURS Y QUICKBIRD. En las figuras 21.6 y 21.7 figuran ejemplos de satélites actualmente empleados para teledetección.

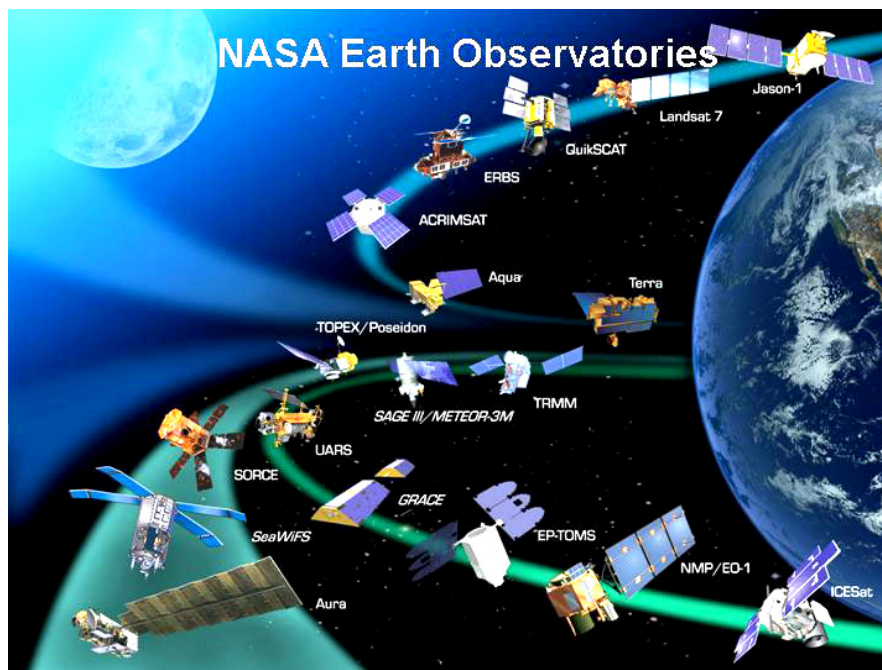


Fig. 21.7. Satélites de la NASA

21.4.3.- Transmisión de datos

La información recogida por los sensores puede encontrarse en forma digital o analógica. Hay varias formas de transmitirla a Tierra:

- **En tiempo real.**- Se envía cada imagen antes de tomar la siguiente. Depende de la existencia de una serie de estaciones receptoras en Tierra.
- **Tiempo real diferido.**- Se emplea un satélite intermedio de retraso que recoge y almacena información procedente de varios satélites y los envía a la estación receptora.
- **Tiempo diferido.**- En el caso de regiones no cubiertas por ninguna estación receptora o también cuando se emplean soportes (fotografía) que deben almacenarse en la plataforma.

21.5.- EL PÍXEL. RESOLUCIÓN DE LOS SENSORES

El *píxel* es la unidad más pequeña de la que se componen las imágenes obtenidas en teledetección. El término proviene de la contracción de las palabras "picture element" (en inglés, "elemento de imagen"). Corresponde a cada una de las informaciones instantáneas tomadas por el sensor en un sistema de barrido o a cada uno de los elementos en que se divide una imagen analógica al ser digitalizada. Del mismo modo

que la pantalla gráfica de un ordenador se divide en una serie de puntos (que también se denominan píxeles) que constituyen el elemento mínimo que puede representarse en la pantalla, las imágenes obtenidas en teledetección están compuestas por una serie de celdillas elementales.

Cada celdilla o píxel representa una zona más o menos amplia del terreno, considerada como una unidad: a esta zona corresponderá una información única, o más exactamente, un solo valor numérico por cada una de las bandas del espectro en las que es capaz de operar el sensor.

Cada imagen digital obtenida por el sensor se divide en una matriz de píxeles ordenados en filas y columnas y referenciados por unas coordenadas que dependen de su posición en la matriz. Además de por sus coordenadas, cada píxel está caracterizado por uno o más valores numéricos, que representan la respuesta de la zona de terreno representada por el píxel a las distintas bandas de frecuencia en las que opera el sensor empleado.

- La **resolución espacial** del sensor vendrá determinada por las dimensiones de la zona de terreno que corresponden a un píxel. Cuanto menor sea esta zona de terreno mayor será la resolución. En principio es conveniente operar con resoluciones grandes, pero en algunas aplicaciones, relativas a áreas extensas y con escalas muy pequeñas, una gran resolución puede ser indeseable al multiplicar innecesariamente el número de píxeles.

En teledetección se habla también de otros tipos de resolución:

- La **resolución espectral** depende del número de bandas espectrales en que el sensor es capaz de dividir la información recibida. Conviene que este número sea el mayor posible, ya que en general la aplicación posterior de las imágenes se verá beneficiada por ello.
- La **resolución radiométrica** se refiere a la posibilidad de eliminar perturbaciones radiométricas (ruido) por parte del sensor, reduciendo así los errores de medida.
- La **resolución temporal** indica la frecuencia de paso de la plataforma porta-sensor por un punto determinado de la superficie terrestre. La capacidad de estudiar fenómenos terrestres o atmosféricos en su dimensión temporal es, como ya se ha indicado, una de las aportaciones más importantes de la teledetección. La frecuencia de paso depende de la órbita seguida por el satélite, y en general, a una mayor resolución temporal corresponderá una menor resolución espacial.

21.6.- PROCESADO DE IMÁGENES

Antes de llegar a los usuarios finales, las imágenes satélite se someten a una serie de procesos que permiten eliminar anomalías y errores instrumentales, así como corregir en lo posible los efectos atmosféricos indeseados. Estos procesos son:

21.6.1.- Correcciones atmosféricas

Tienen en cuenta las perturbaciones que sufre la radiación electromagnética al atravesar la atmósfera. Estas perturbaciones son de dos tipos:

- **Geométricas:** La densidad de la atmósfera varía con la altura y como consecuencia, el índice de refracción de la atmósfera también varía. Debido a ello, la radiación electromagnética no atraviesa la atmósfera siguiendo una línea recta.
- **Radiométricas:** Se deben a la interacción de la radiación con las partículas o moléculas que componen la atmósfera. Se producen dos efectos: absorción y dispersión de la radiación, que provocan la atenuación de la señal recibida. Además, es preciso tener en cuenta la radiación propia de la atmósfera que también va a ser captada por el sensor.

21.6.2.- Correcciones instrumentales

Tienen en cuenta las condiciones en que se ha efectuado la toma de datos (falta de estabilidad de la plataforma, dirección de observación oblicua, etc.). Para realizarlas es preciso conocer la función del aparato y la ecuación de calibrado, obtenida a partir del sistema de calibración en vuelo del equipo receptor. Para estimar la radiancia a nivel del terreno se corrigen los datos recibidos por el sensor mediante dos procesos:

- **Deconvolución instrumental:** La corrección se realiza teniendo en cuenta la función del aparato y la ecuación de calibrado. Permite estimar la radiancia a nivel del sensor.
- **Deconvolución atmosférica:** Conocidos los parámetros atmosféricos, podremos calcular la transmisividad y la radiancia atmosféricas y a partir de estos datos y de los obtenidos tras aplicar la transformación anterior, estimar la radiancia a nivel del terreno.

Los valores obtenidos para la radiancia a nivel del terreno permiten determinar los parámetros ópticos (emisividad, reflectividad) correspondientes a cada pixel y, en definitiva, asignarle los valores numéricos que caracterizarán a la zona de terreno representada por él.

A menudo interesa que las imágenes que recibe el usuario estén *georreferenciadas*, es decir referidas a alguno de los sistemas de coordenadas normalmente empleados. La georreferenciación se realiza dando las coordenadas reales, en el sistema elegido, de una serie de puntos (píxeles) claramente identificables en la imagen. Un ordenador se encargará de "deformar" la imagen original, recalculando cada uno de los píxeles, para obtener la imagen métrica final.

Finalmente, toda la información se almacena en soporte magnético. Los usuarios que adquieren imágenes de teledetección las reciben generalmente en este tipo de soporte, pero a menudo se proporcionan también imágenes sobre emulsión fotográfica o de otro tipo.

21.7.- TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El formato matricial en que se almacenan los datos obtenidos, consistentes en una serie de valores numéricos para cada uno de los píxeles que constituyen la imagen, es muy adecuado para someterlo a una serie de procesos digitales que permitirán obtener el máximo partido de la información. De hecho, al hablar de teledetección, no nos referimos únicamente a las técnicas de obtención de información, sino también a las de tratamiento posterior de la misma. Las técnicas a emplear dependerán del tipo de estudio que se pretende realizar.

Algunas de las etapas de tratamiento digital pueden ser realizadas por las empresas dedicadas a la distribución comercial de las imágenes, a petición del usuario, o por el mismo usuario si dispone de los sistemas informáticos (hardware y software) adecuados. Estos son algunos de los tipos de tratamiento de información empleados en teledetección:

- Georreferenciación de las imágenes.
- Operaciones de filtrado, realce, suavizado, etc.- Tienen por objeto resaltar determinadas características de la información y, en general, mejorar la imagen.
- Composición de colores.- Se realiza aplicando cada uno de los tres colores básicos (rojo, verde y azul) a una banda distinta del espectro. La intensidad de cada color en cada píxel corresponderá al valor numérico del píxel en la banda correspondiente a ese color. Superponiendo las tres imágenes se obtiene otra, de gran riqueza cromática, en color verdadero o falso color, donde puede apreciarse una gran cantidad de información.
- Técnicas de clasificación.- Permiten clasificar los píxeles en función de su respuesta multiespectral, es decir de la información en todas las bandas disponibles del espectro. Cada una de las clases se relaciona con las características reales del terreno mediante tests realizados en éste (obtención de la verdad-terreno).
- Análisis de componentes principales.- Aplicando las técnicas estadísticas del Análisis Multivariante.
- Elaboración de índices.- Los índices son combinaciones aritméticas de los valores numéricos de los píxeles, para obtener nuevos valores que indiquen con mayor claridad determinadas características de la zona estudiada. Se emplean muchos tipos de índices, en general para estudios sobre vegetación.
- Combinación de imágenes obtenidas por distintos satélites.- En ocasiones se combinan las imágenes de dos satélites distintos para mejorar las prestaciones (resolución espacial, temporal o espectral) de la imagen resultante. En otros casos se combinan imágenes satélite con información de otros tipos (fotografías, mapas, etc.), previamente digitalizada.

21.8.- SIGNATURA ESPECTRAL. LA VERDAD-TERRENO

La *signatura espectral* de un elemento es la respuesta espectral de ese elemento, en términos de reflectividad o radiancia, en las distintas zonas del espectro electromagnético. En diversos estudios sobre vegetación se ha comprobado que la curva

que representa la reflectividad de cada grupo vegetal, en función de la longitud de onda, es específica del grupo y puede servir para caracterizarlo (figura 21.8). La signatura espectral funcionaría como una especie de firma o huella dactilar que puede permitir identificar los elementos del grupo, al que caracteriza, a partir de las imágenes satélite. De esta forma, es posible clasificar automáticamente los píxeles, y asignarlos al grupo vegetal que les corresponda, comparando sus valores numéricos con los correspondientes a la signatura espectral de cada grupo. En estudios de otro tipo se ha intentado, igualmente, realizar este tipo de procesos basados en la signatura espectral de cada uno de los elementos de interés.

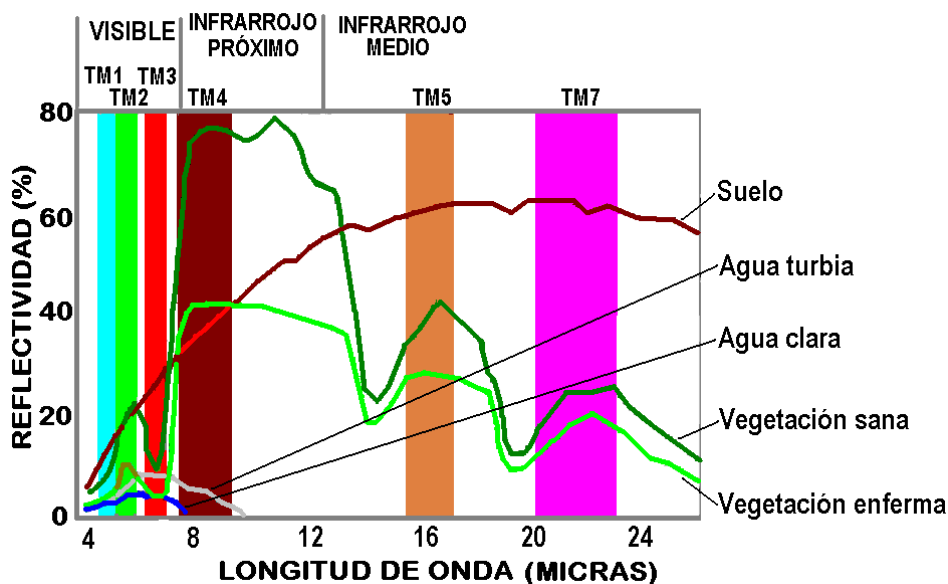


Fig .21.8. Ejemplo de "firma espectral": respuesta de un material en diferentes frecuencias

En la práctica, estas aplicaciones encuentran dificultades, motivadas fundamentalmente por la insuficiente resolución espacial de los sensores empleados. Así, en la zona de terreno correspondiente a un píxel (que puede suponer varios cientos de metros cuadrados) coexistirán elementos muy distintos y los datos obtenidos serán una combinación de los característicos de cada uno de estos elementos.

En cualquier caso, estudios de este tipo suponen la obtención sobre el terreno de datos fiables, correspondientes a determinadas parcelas test. Esta "*verdad-terreno*" va a permitir correlacionar los valores numéricos de los píxeles de esas parcelas con información real (tipo de cultivo, utilización del suelo, etc.) y extrapolar los resultados obtenidos a los restantes píxeles que componen la imagen.

21.9.- APLICACIONES

Muchas son las aplicaciones prácticas de las imágenes digitales obtenidas en teledetección. Se resumen algunas de ellas:

- **Aplicaciones meteorológicas.**- Algunas, como las del satélite Meteosat, bastante conocidas. Se determinan características atmosféricas, precipitaciones, flujos de aire, temperaturas, etc.

- **Cartografía** a pequeña escala, en particular para zonas donde no se dispone de ella y resulta interesante obtenerla de forma rápida, a coste reducido y en un sistema fácil de actualizar gracias a su valor temporal, obteniendo incluso Modelos Digitales del Terreno mediante estereoscopía (figura 21.9).
- **Medio ambiente**.- La teledetección permite un control periódico de los fenómenos naturales o antrópicos en la superficie terrestre.
- **Oceanografía**.- Situación de corrientes marinas, cartografía de fondos marinos, etc.
- **Geología y minería**.
- **Agricultura**; geografía agraria.
- **Usos del suelo**; densidad de población, etc.
- **Aplicaciones didácticas**, aprovechando la capacidad sintética y la visión muy plástica que ofrecen las imágenes satélite.

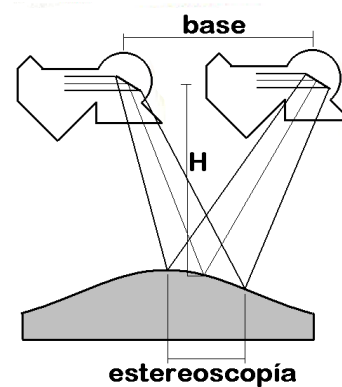


Fig. 21.9. Estereoscopía

22. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

22.1.- QUÉ ES UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un SIG o Sistema de Información Geográfica (en inglés GIS, siglas de Geographical Information System) es una herramienta informática para el almacenamiento, visualización, gestión y análisis de información geográfica, es decir de información con una referencia geográfica dada. Antes de la aparición de los SIG la gestión se realizaba mediante los mapas temáticos, esto es, con información sobre papel estática y de contenido limitado. Cada vez más se demanda el acceso a la información territorial de forma rápida, fiable y actual.

Los SIG asocian informáticamente y de forma conjunta la situación espacial de los elementos y la información temática asociada a ellos (características de dichos elementos). Por tanto, un SIG tiene que trabajar a la vez con ambos tipos de información: espacial y temática. Estos sistemas tienen que ser capaces de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y presentar los resultados.

Un SIG también puede definirse como un modelo de una parte de la realidad, referido a un determinado sistema de coordenadas, que se crea para satisfacer necesidades concretas de información. Integra funciones típicas de las bases de datos (consultas, análisis estadísticos, etc.) con las propias de la cartografía digital (visualización, análisis geográfico, etc.). Muchos autores hacen referencia al carácter multidisciplinar que es característico de estas técnicas.

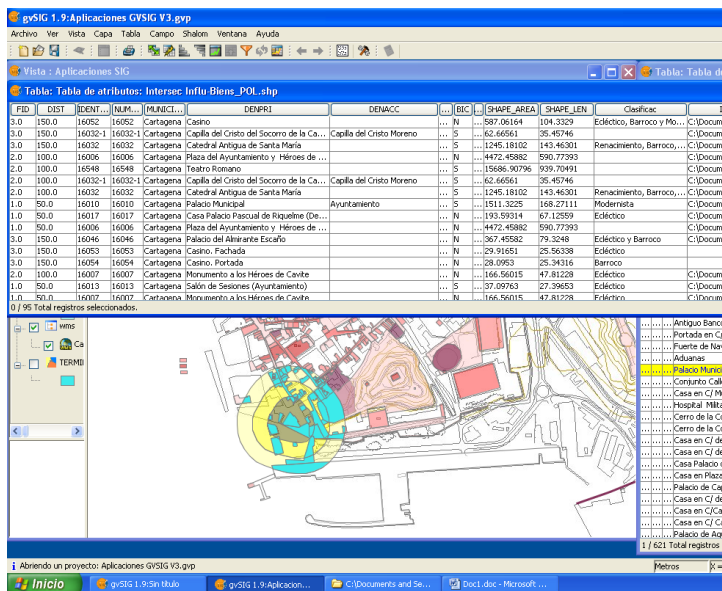


Fig. 22.1. Captura de pantalla de un SIG

En un SIG se distinguen los siguientes componentes:

- **Hardware.-** El ordenador u ordenadores en los que funciona el sistema y sus periféricos (de entrada y de salida); también las unidades de almacenamiento.
- **Software.-** Existen muchos programas de distintas casas comerciales y algunos en software libre. La elección del software depende de las

aplicaciones concretas para las que se vaya a emplear y del tipo de análisis que se requiera de él. Los usuarios experimentados suelen utilizar varios programas distintos.

- **Datos.**- La información es la base de todo el sistema y el elemento más costoso. La información geográfica resulta difícil de generar y de actualizar.
- **Metodología.**- Los procedimientos que se establezcan para el desarrollo de un proyecto mediante SIG. Estarán determinados por el plan de trabajo que se diseñe en función de los objetivos del proyecto.
- **Personas.**- Todos los que vayan a trabajar con el SIG, tanto técnicos especializados como público en general. Estos últimos tienen que tener acceso a la información, lo que supondrá que determinadas funciones del programa sean fáciles de emplear pero también requerirá de ellos una cierta formación

22.2.- LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La información geográfica es la constituida por datos localizados, es decir con una referencia geográfica dada, que se emplean en operaciones administrativas y legales o en proyectos científicos y de ingeniería, entre otros. Estos datos suelen llevar asociada una información temática alfanumérica que se vincula a su posición espacial. Todos los datos geográficos están localizados en un sistema de referencia dado (*georreferenciados*). La localización puede ser directa, asociando a cada dato unas coordenadas (geográficas o UTM, por ejemplo), o indirecta, refiriéndolos a determinadas unidades territoriales administrativas (como el código postal, el municipio, etc.). Se estima que el 80% de la información que se maneja en empresas y organismos de todo el mundo está georreferenciada.

La gestión de la información geográfica en un SIG pasa por las siguientes etapas:

- entrada de datos: generación de información geográfica e introducción en el SIG
- manejo: almacenamiento, recuperación, consultas, etc.
- manipulación y análisis: obtención de nueva información a partir de las relaciones espaciales de los datos
- salida: a ficheros, mapas digitales o en papel, etc.

Los mapas clásicos suelen incluir información de varios tipos: divisiones administrativas, usos del suelo, carreteras, poblaciones, etc. En un SIG la información temática se mantiene por separado (en capas o coberturas) y se combina en el momento oportuno para emplearla en el análisis o para mostrarla (figura 22.2).

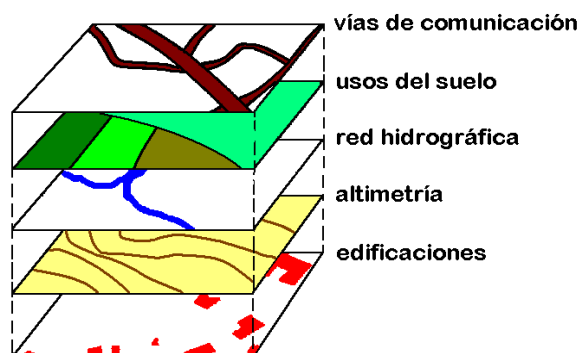



Fig. 22.2. Capas temáticas

La información se almacena en forma de capas temáticas enlazadas geográficamente. Cada capa de información representa un aspecto del territorio: carreteras, red hidrográfica, viviendas, usos del suelo, geología, vegetación, etc. La información alfanumérica se almacena en forma de tablas, de manera individual o en conjuntos organizados (bases de datos). Las columnas se llaman campos (fields) y las filas registros (records). El diseño más habitual de una base de datos para SIG es el relacional, en el que los datos se almacenan en una colección de tablas vinculadas o enlazadas por sus campos en común (figura 22.3).



ID	AÑO	VEL_PROY	VEL_ESP	EMP	EXP
1	2006	120	120	DRAGADOS	GIASA
2	2003	120	120	FCC	GIASA
3	2005	120	120	ACS	GIASA
4	2005	120	120	OHL	GIASA
5	2002	120	120	FERROVIAL	GIASA

ID	PKO	PKF	TIPO_FIRME	ESP_TOTAL	TIPO_RO
1	0	120	Flexible	18	M-10
8	1	120	Semiflexible	16	M-10
9	1	400	Semirrígido	23	M-10
10	1	610	Rígido	8	M-10
11	1	850	Flexible	6	M-10
2	0	150	Semiflexible	18	M-10
3	150	200	Semirrígido	15	M-10

Fig. 22.3. Base de datos relacional

Las relaciones que se establecen entre los elementos representados en un SIG permiten describir sus posiciones relativas y se emplean para el análisis espacial. La Topología es la rama de las Matemáticas que estudia estas relaciones. Es fundamental en el desarrollo de los SIG y determina en gran medida su capacidad de análisis. La Geometría es cuantitativa, mientras que la Topología describe las relaciones espaciales de forma cualitativa. La combinación de las dos permite que los SIG respondan a preguntas como:

- ¿qué hay junto al elemento X?
- ¿qué elementos se sitúan a menos de 500m del elemento Y?
- ¿qué distancia hay entre dos elementos dados?
- ¿cuál es la siguiente parada en una línea de autobús?
- ¿cuál es el camino más corto entre dos elementos dados?

La forma de establecer y tratar las relaciones espaciales dependerá del tipo de estructura de datos que maneje el SIG, *ráster* o *vectorial*.

22.3.- TIPOS DE SIG

En función de la forma de modelizar la realidad y de almacenar los datos, podemos distinguir dos tipos: SIG vectoriales, que almacenan la información espacial fundamentalmente mediante elementos geométricos (puntos, líneas y polígonos), y SIG ráster, que dividen el espacio en una cuadrícula regular y manejan la información en forma matricial.

22.3.1.- SIG vectoriales

Los SIG vectoriales representan la geometría de las figuras digitalmente, mediante tres elementos geométricos:

- el punto, definido por sus coordenadas
- la línea, definida por una sucesión de puntos
- el polígono, definido por una sucesión cerrada de líneas que rodean una superficie

El interés se centra, fundamentalmente, en la precisión de la situación espacial, definiendo fenómenos de límites bien establecidos. Cada uno de los elementos tendrá asociada una base de datos que describa los atributos de ese objeto (figura 22.4).

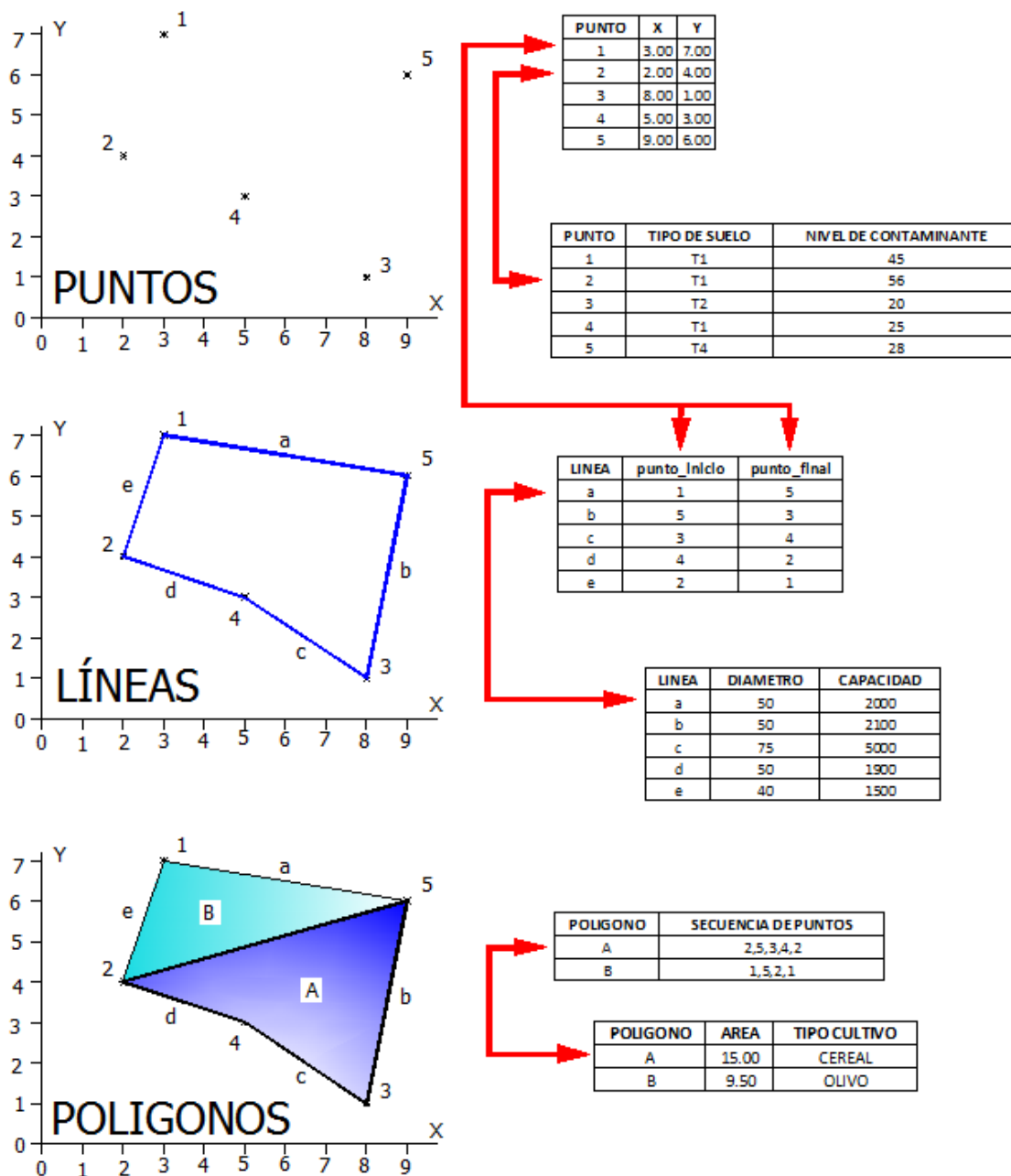


Fig. 22.4. Elementos geométricos de un SIG vectorial

Los SIG vectoriales son más adecuados cuando se representan objetos con límites bien establecidos, como pueden ser parcelas, caminos, etc. En este tipo de SIG se pueden establecer relaciones espaciales basadas en una topología arco-nodo, definida por la direccionalidad, la conectividad y la proximidad. Ése es el método usado para definir las relaciones espaciales entre los objetos que nos van a permitir realizar consultas conjuntas, tanto espaciales como temáticas.

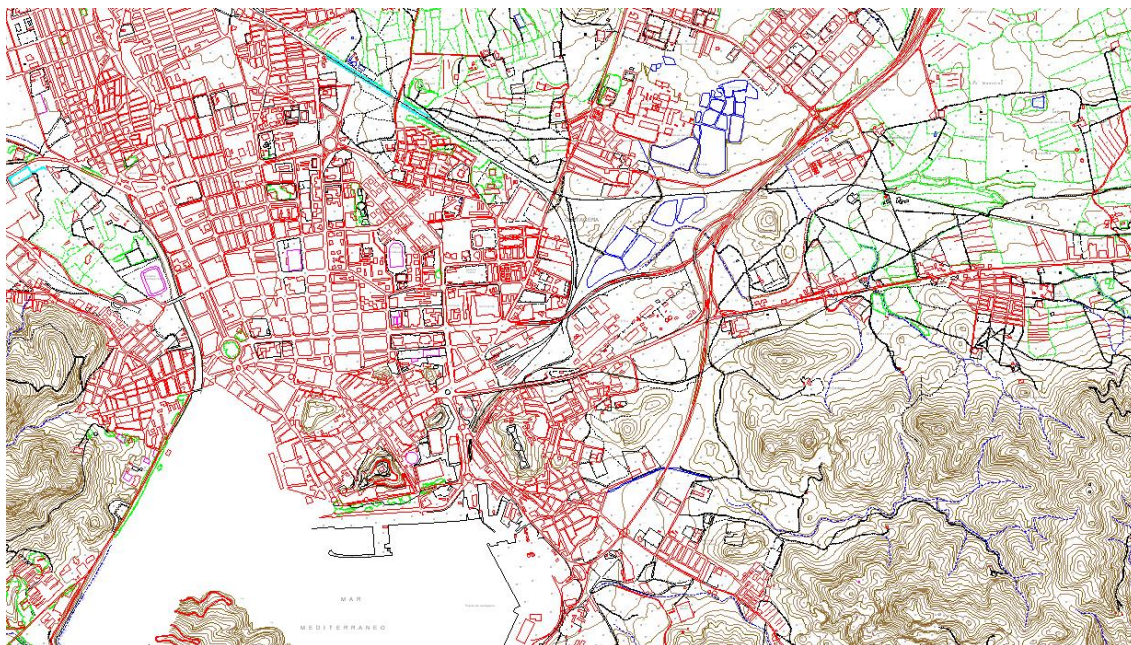


Fig. 22.5. Ejemplo de SIG vectorial: Mapa topográfico. Los elementos están representados mediante, puntos, líneas o polígonos cerrados (fuente: www.ign.es)



Fig. 22.6. Ejemplo de SIG vectorial: Mapa del SIOSE, Sistema de Información de Ocupación del Suelo (fuente: Ministerio de Medio Ambiente www.siose.es)

Un ejemplo de consulta podría ser: **Indícame cuál el camino más rápido entre dos puntos dados.** Para responder hay que conocer qué líneas están unidas (parte topológica), analizar sus longitudes y ver la velocidad límite en ellas (parte temática). Otro ejemplo: **Señala las parcelas que están junto al barranco de La Quintilla que tienen cultivo de cítricos y poseen un pozo de agua propio.** El análisis topológico consistiría en identificar las parcelas contiguas al elemento lineal “barranco” y buscar los puntos que se encuentren dentro de esas parcelas. La parte temática sería buscar las parcelas con “cítricos” y los puntos con “pozo” que coincidieran con las anteriores.

La estructura vectorial permite que la información se almacene en un espacio mínimo, ya que se requiere mucha menos memoria para almacenar unas coordenadas y los datos temáticos asociados que para el caso de una estructura matricial, en la que debe incluirse la información correspondiente a cada píxel.

22.3.2.- SIG ráster

Los SIG ráster dividen el espacio en celdas cuadradas regulares, lo que, en esencia, es una imagen digital dividida en píxeles. Conociendo las coordenadas del centro de una de ellas y el tamaño de la malla regular se pueden calcular las coordenadas del resto y, por lo tanto, la imagen está georreferenciada. La parte temática se resuelve asignando valores numéricos a cada celda.

Cuanto mayores sean las dimensiones de las celdas menor es la resolución. El modelo ráster es de aplicación cuando hay que definir información asociada a zonas con límites difusos, como niveles de contaminación. Para definir espacialmente los objetos con precisión es necesario que las celdas sean lo más pequeñas posibles, lo que nos llevará a una resolución alta y por tanto un aumento de memoria, por lo que necesitaremos de más potencia computacional para tratar dicha información.

Algunos ejemplos de datos ráster pueden ser: fotos aéreas, modelos de elevaciones del terreno, temperaturas, usos del suelo, pluviometría, etc. A cada celda le corresponderá el valor que tome la variable en la superficie de terreno representado por el píxel. Los análisis o consultas que se pueden realizar con este tipo de SIG se solucionan superponiendo imágenes, es decir comparando diferentes valores temáticos en el mismo espacio (en las mismas celdas). Se trata de consultas como: **Selecciona las zonas cuyo uso del suelo sea bosque y que se encuentren por encima de 500 metros sobre el nivel del mar.**

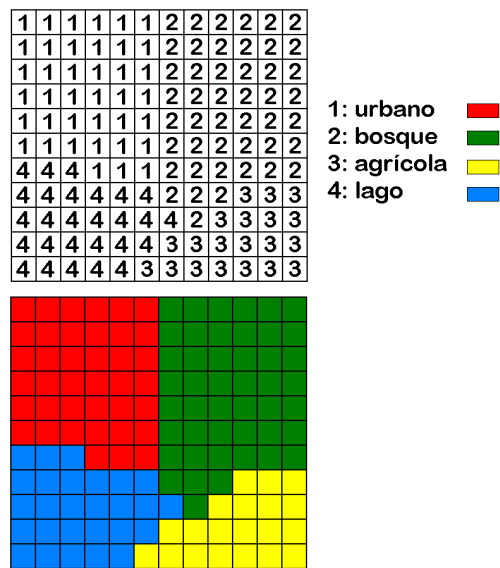


Fig. 22.7. Formato ráster

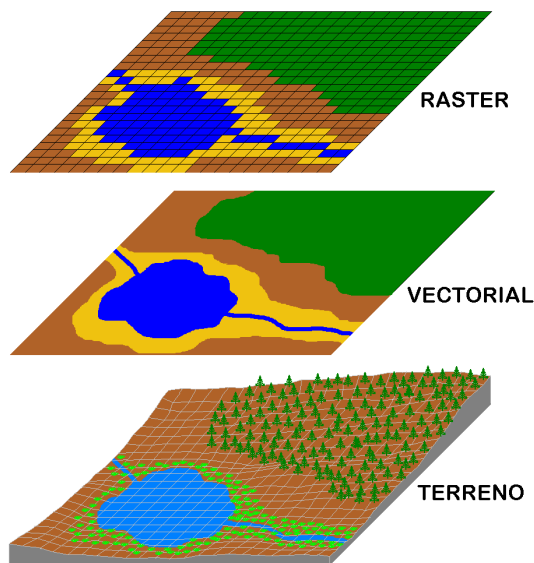
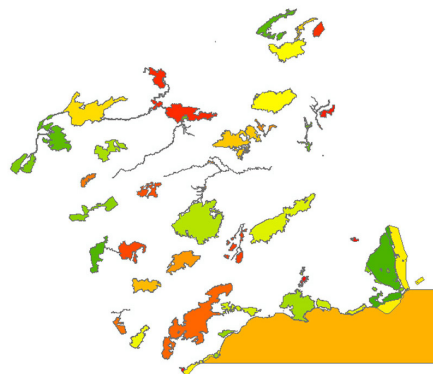


Fig. 22.8. Tipos de SIG



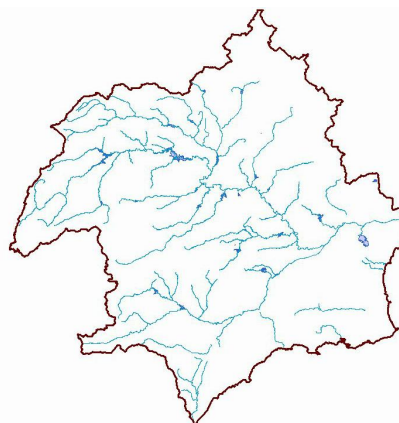
Cuencas de aguas subterráneas (vectorial)



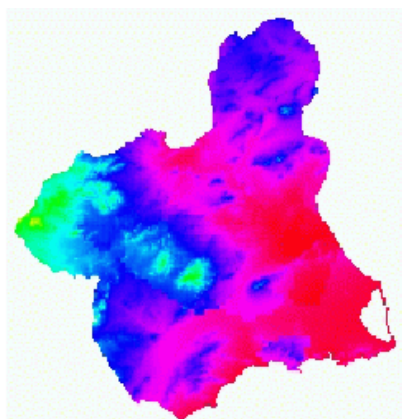
Lugares de Interés Comunitario (ráster)



Modelo Digital de Elevaciones (ráster)



Cuenca hidrográfica y red fluvial (vectorial)



Mapa de temperaturas medias (ráster)

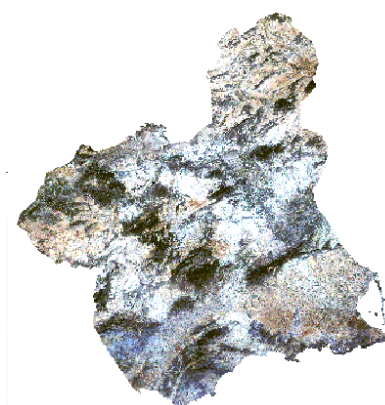


Imagen de teledetección (ráster)

Fig. 22.9. Diversos ejemplos de información vectorial o ráster de la región de Murcia

El formato ráster presenta limitaciones cuando interesa representar puntos y líneas, que por definición no tienen extensión o anchura, respectivamente; en este formato esos objetos obtienen automáticamente una extensión, que es la que corresponde al tamaño del píxel. Pero resulta adecuado en el tratamiento de datos que varían de forma continua, como la altitud, la temperatura, la precipitación, la densidad de vegetación, etc. Estas variables encuentran una representación más operativa en el formato ráster que, además, es el propio de las imágenes de satélite y

de las fotos aéreas digitales, lo que permite que puedan ser incorporadas y tratadas fácilmente en un SIG de este tipo.

Las relaciones espaciales entre las celdas en un SIG ráster se producen, generalmente, como análisis de vecindad. Las entidades espaciales se conforman a partir de la proximidad física y de atributos comunes entre los píxeles.

Entre las herramientas SIG disponibles existen muchas que son capaces de manejar simultáneamente información de los dos tipos, ráster y vectorial. La figura 22.9 muestra varios ejemplos de información vectorial y ráster. Nótese que los dos primeros ejemplos pueden ser de uno u otro tipo según estén definidos mediante polígonos o píxeles respectivamente.

22.4.- CÓMO SE GENERA LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La captura y la introducción de información geográfica consiste en transformar los datos reales que nos interesan en datos digitales apropiados para ser gestionados por el SIG, lo que significa simplificar y alterar la realidad y, generalmente, incorpora una serie de errores.

Dependiendo de la estructura de datos SIG que se emplee (vectorial o ráster) el proceso de obtención e introducción de la información y el coste asociado a este proceso serán muy diferentes.

22.4.1.- En formato ráster

En el caso de entrada manual de información se empieza por elegir las dimensiones de las celdas o píxeles, que tienen que ver con el tipo de información a manejar y su tamaño mínimo. En cada celda se introduce el valor de la variable en cuestión:

- Presencia/ausencia (1/0): para indicar la existencia o no de un determinado elemento, fenómeno, etc. en el interior de la superficie de terreno representada por el píxel.
- Número de elementos, por ejemplo árboles, que hay en la superficie de terreno representada por el píxel.
- Valor temático: el código que corresponde al valor de la variable en el interior del píxel. Por ejemplo: 1 para cereales, 2 para cítricos, etc. Si coexisten varios valores se puede dar el código del que predomina, el del que ocupa el punto central del píxel, o el % de cada uno de los valores.

La entrada automática puede proceder de:

- Escáneres: para digitalizar en formato ráster cartografía antigua, ortofotos aéreas no digitales, etc.
- Archivos digitales de imágenes de Teledetección, ortofotos aéreas digitales, etc.

22.4.2.- En formato vectorial

La información procedente de cartografía analógica previamente disponible puede digitalizarse en una mesa digitalizadora o en la pantalla del ordenador.

También puede obtenerse información digital en formato vectorial de otras fuentes:

- Sistemas GNSS, topografía, restituciones fotogramétricas, etc.
- Archivos digitales procedentes de programas de CAD.
- Archivos digitales procedentes de organismos públicos.
- Etc.

La información ráster se puede transformar en vectorial mediante el proceso denominado *vectorización* (fig. 22.10). La información vectorial se puede transformar en ráster por *rasterización* (fig. 22.11).

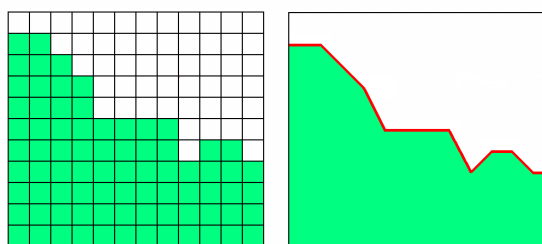


Fig. 22.10. Vectorización

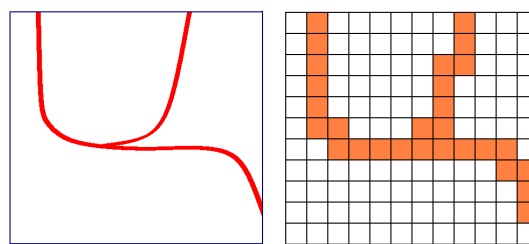


Fig. 22.11. Rasterización

22.5.- FUNCIONES DE LOS SIG

Uno de los aspectos más interesantes de los SIG es la posibilidad de generar nueva cartografía a partir de la información geográfica inicial: un mapa de distancia a la estación de servicio más próxima a partir de datos sobre la red de estaciones, un mapa del índice de erosión a partir de información sobre de tipo de suelo y cubierta vegetal en combinación con precipitaciones y pendiente del terreno, etc.

El análisis espacial está condicionado por la existencia de relaciones topológicas entre los elementos que constituyen la información geográfica gestionada por el SIG y permite realizar cálculos entre variables a partir de los cuales pueden obtenerse nuevos datos.

22.5.1.- Análisis ráster

En el caso de SIG ráster el análisis se realiza operando en cada píxel con los valores de las variables que corresponden a cada una de las coberturas (capas temáticas). Las siguientes funciones son características de este formato:

- **Consultas.**- Podemos solicitar información acerca de una posición o lugar determinado en el área estudiada, por ejemplo, el tipo de vegetación de una zona concreta, su altitud o el tipo de uso de suelo. También podemos consultar acerca de un atributo en concreto, por ejemplo, cuántas celdas

corresponden a un determinado cultivo o cuáles presentan una altitud superior a 500m.

- **Reclasificación.**- Partiendo de una determinada capa se obtiene otra mediante operaciones matemáticas con los valores iniciales. Por ejemplo: cambiar el valor de todas las celdas con un mismo atributo por otro valor, unir dos valores diferentes en uno, clasificar por intervalos una variable continua, etc.
- **Superposición.**- Son operaciones realizadas sobre más de una capa con el objetivo de obtener una capa nueva (figura 22.12). Puede tratarse de operaciones aritméticas, realizadas con los valores de cada celda, o de operaciones de lógica booleana. Estas últimas se emplean para localizar las áreas en las que se cumplen determinadas condiciones, por ejemplo, que correspondan a un determinado cultivo y, a la vez, estén a más de 500m de altitud o que sean de suelo urbanizable pero no correspondan a determinado término municipal, etc.
- **Vecindad.**- El valor nuevo que se asigna a cada celda se obtiene de los correspondientes a las celdas relacionadas con ella. Las relaciones pueden ser de vecindad inmediata (celdas contiguas) o de vecindad extendida (en función de la distancia). Este tipo de análisis se emplea, por ejemplo, para obtener mapas de pendientes a partir de altitudes o para el filtrado (suavizado o realce) de determinadas variables.

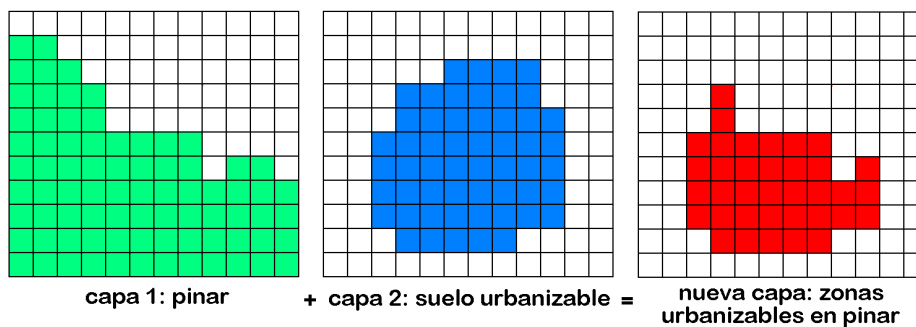


Fig. 22.12. Superposición (ráster)

22.5.2.- Análisis vectorial

El formato vectorial es más apropiado para determinados tipos de análisis, que dependen del tipo de elementos a considerar. El análisis de superposición es propio de los polígonos, mientras que el de redes lo es de líneas. Las siguientes funciones son características de este formato:

- **Identificación de elementos.**- Consultas a la base de datos de atributos sobre un determinado elemento.
- **Mediciones.**- Se pueden determinar longitudes (líneas), perímetros (polígonos), distancias euclidianas a determinados elementos (puntos y líneas), superficies limitadas por polígonos, etc.
- **Proximidad.**- Se trata de delimitar la zona situada a menos de una determinada distancia de un elemento determinado (figura 22.13). Es análogo al análisis de vecindad del formato ráster.

- **Superposición.**- Esta función presenta mayores dificultades en el formato vectorial, entre otras razones por la posibilidad de superponer elementos distintos (punto con línea, línea con polígono, etc.).
- **Análisis de redes.**- Una de las posibilidades del análisis espacial a partir de la topología es la de construir sistemas de redes, que pueden ser de muchos tipos (hidrográficas, carreteras, eléctricas, etc.). Los análisis más frecuentes en este ámbito son los de búsqueda de rutas óptimas y los de redes de influencia de lugares centrales.

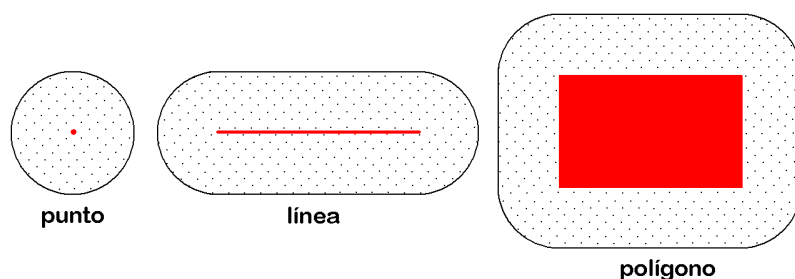


Fig. 22.13. Proximidad (vectorial)

22.6.- INFORMACIÓN EN INTERNET

Existen en Internet distintos servicios SIG que realizan funciones como buscar rutas óptimas o direcciones, acceder a bases de datos de organismos públicos, visualizar datos meteorológicos o medioambientales, etc. En muchos casos se muestra y se maneja información estática o que no varía en mucho tiempo; en otros la información se actualiza automáticamente con cierta frecuencia.

La información en Internet puede estar disponible:

- mediante visualizadores que permiten hacer consultas, pero no realizar operaciones de análisis
- mediante capas que pueden descargarse en un ordenador propio, lo que permite el análisis posterior de los datos que contienen

Los SIG en Internet pueden funcionar de diferentes formas:

- **Servicio WMS (Web Mapping Service).**- Permite visualizar las capas como simples imágenes, pero sin acceso a la tabla de atributos.
- **Servicio WFS (Web Feature Service).**- Permite acceder a la tabla de atributos de las capas vectoriales e incluso hacer cambios o insertar nuevos elementos.
- **Servicio WCS (Web Coverage Service).**- Permite acceder a capas ráster y procesar o transformar los datos almacenados como respuesta a la petición del usuario.
- **Servicio WPS (Web Processing Service).**- Permite realizar análisis espacial sin tener un SIG instalado en nuestro ordenador personal.

22.7.- MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Un *Modelo Digital del Terreno* (MDT) es una estructura numérica que representa determinadas características de la superficie del terreno (pendientes,

orientaciones, etc.) relacionadas con la posición geográfica de los puntos que lo constituyen y con su altitud. La base de un MDT es un *Modelo Digital de Elevaciones* (MDE) que representa la distribución geográfica de la altitud del terreno.

Existen distintos formatos para gestionar numéricamente la información altimétrica. Los más habituales son:

- **Curvas de nivel:** Cada curva está constituida por pares de puntos cuya posición está definida por sus coordenadas X , Y y cuya coordenada Z es la misma para todos ellos.
- **Red irregular de triángulos (TIN):** La superficie real del terreno se sustituye por una serie de triángulos, cuyos vértices son puntos conocidos y definidos por sus coordenadas X , Y y Z .



Fig. 22.14. Curvas de nivel y red irregular de triángulos

La malla de triángulos puede adaptarse al terreno con más o menos detalle, dependiendo de la complejidad del mismo y de la información disponible.

- **Modelo ráster:** Basado en una estructura matricial. El terreno se divide en celdas cuadradas regulares, cada una identificada por las coordenadas planas de su centro, X e Y . En este caso, la variable numérica a considerar es la altitud Z propia de cada celda, que tomará un valor medio de las de los correspondientes puntos del terreno.

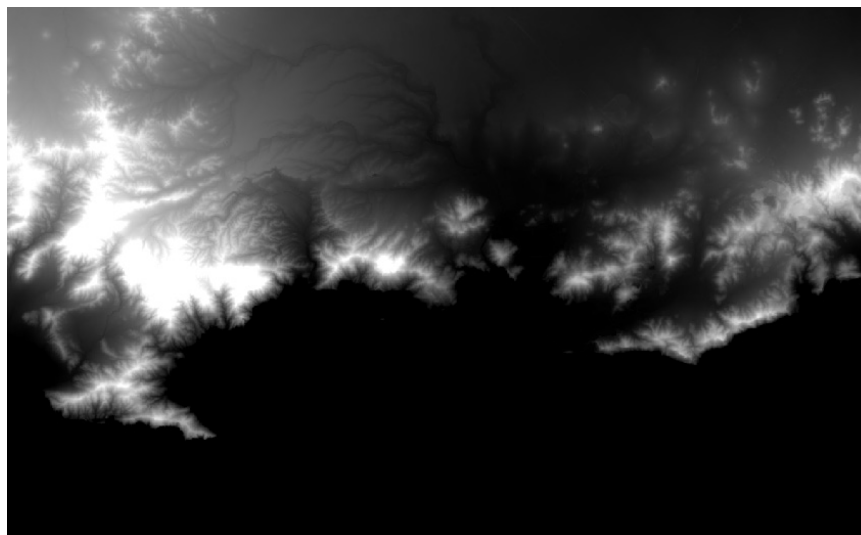


Fig. 22.15. MDE ráster, zona de Cartagena (fuente: IGN)

22.7.1.- Generación de un MDE

La información necesaria para construir un MDE está constituida por las coordenadas X , Y y Z de una serie de puntos, tan densa como requiera la precisión del modelo y que debe representar adecuadamente al terreno. Los modelos ráster suelen

generarse por interpolación, estimando el valor de la coordenada Z en cada celda a partir de las de los puntos conocidos más próximos.

La información de base puede obtenerse:

- digitalizando información cartográfica previamente existente
- a partir de un levantamiento topográfico convencional
- a partir de un levantamiento por GNSS
- mediante Fotogrametría
- mediante Teledetección (interferometría rádar)

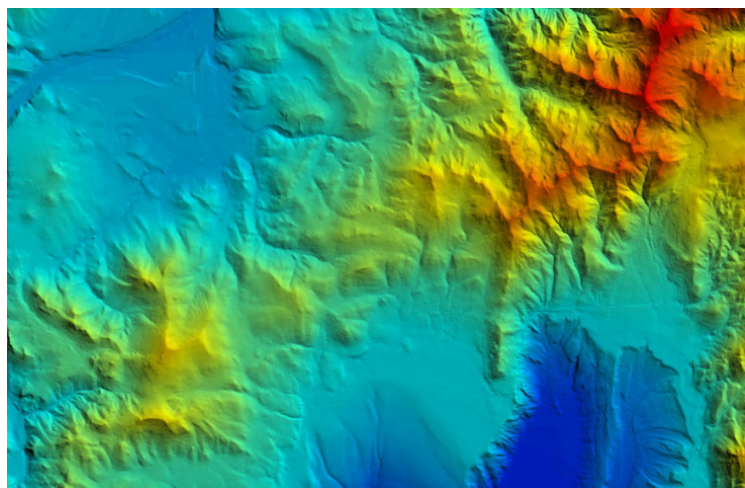


Fig. 22.16. MDE ráster (fuente: Satellite Imaging Corporation)

22.7.2.- Aplicaciones

Los MDE se emplean para cualquier aplicación en la que intervenga, directa o indirectamente, la altimetría. La combinación de la información altimétrica con la relativa a las relaciones espaciales entre los elementos de los sistemas vectoriales o entre las celdas de los sistemas ráster, propias de los SIG, permite realizar análisis y generar modelos como los que, sin ánimo de ser exhaustivos, se citan a continuación:

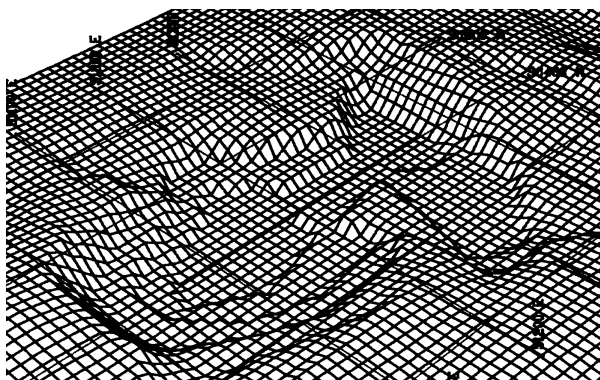


Fig. 22.17. Representación en perspectiva del MDE ráster de una explotación minera

- Obtención de **variables topográficas**, como la pendiente o la orientación
- Realización de **análisis estadísticos** sobre variables del terreno, como la altitud, la pendiente, etc.
- Generación de **modelos hidrológicos**: trazado de líneas de flujo, determinación de cuencas fluviales, etc., a partir de la información contenida en el MDE
- Modelos de **visibilidad**: análisis de impacto visual y de intervisibilidad entre puntos, para la ubicación de infraestructuras y para el diseño de sistemas de control

- Modelos **climáticos**: determinación de los valores de variables climáticas dependientes del relieve (como la insolación) y estimación de los de otras derivadas (vegetación, etc.)
- Modelos de **probabilidad, riesgo o vulnerabilidad**: a través de la combinación de variables que tienen influencia en que pueda ocurrir un determinado suceso y su relación con poblaciones o usos del suelo.
- Modelos de **idoneidad**: analizan la adecuación de una determinada área para que se dé en ella un determinado uso.

23. LÁSER ESCÁNER

23.1.- QUÉ ES EL ESCANEADO LÁSER

Un *escáner 3D* es un instrumento que toma automáticamente coordenadas tridimensionales de la superficie de un objeto, creando una nube de puntos y, con ellos, aproximando la forma del objeto. La utilidad del escaneado es que podemos obtener gran cantidad de puntos, con una alta precisión y en un tiempo corto.

Existen diferentes tipos de escáneres 3D: los escáneres de mesa miden sobre un plano la altura del objeto, mediante un láser o apoyando un palpador sobre la superficie; otros escáneres proyectan varios haces de luz y registran la forma del objeto. En este tema nos vamos a centrar en los usados habitualmente en topografía, que emiten un láser en una dirección del espacio y miden la distancia al objeto en dicha dirección, de forma similar a la toma de datos con una estación total. Además, generalmente también registran la intensidad de la señal, por lo que dispondremos de una “textura” del objeto.

Los equipos que se emplean actualmente también realizan tomas fotográficas, lo que permite asignar color a la reconstrucción de la geometría del objeto con el software adecuado (figura 23.1).



Fig. 23.1. Composición de puntos más fotos = texturizado. Leica

Los escáneres láser usados en topografía y cartografía se pueden dividir en dos categorías: dinámicos y estáticos.

23.1.1.- Escaneado láser dinámico.

Cuando el sensor se encuentra en movimiento mientras se realiza el escaneado se dice que es dinámico.

En este caso el instrumento, además de disponer del escáner, necesita ir provisto de otros componentes que ayuden a calcular las coordenadas y la orientación justo en el momento de la medición. Estos componentes son: un GNSS que mide cada cierto tiempo la posición y un INS (Sistema de Navegación Inercial) que contiene sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación (giróscopos) que indican la posición, orientación y velocidad. La combinación de ambos permite saber en todo momento dónde y cómo estaba el escáner y, a partir de ahí, deducir las coordenadas de la nube de puntos.

Según la finalidad del trabajo a realizar este tipo de escáneres se instalan en diferentes vehículos y permiten medir distintas superficies, por ejemplo sobre un coche se podría escanear el asfalto (para detectar baches) o sobre un avión se podría obtener el Modelo Digital del Terreno.

23.1.2.- Escaneado láser estático.

Cuando el escáner se encuentra fijo en un punto mientras se toman los datos, se llama escaneado estático. Normalmente esto permite conseguir mayor densidad de puntos y mejores precisiones al poder conocer mejor la situación y orientación de la toma de datos. El escáner se puede situar sobre un punto de coordenadas conocidas o bien se puede calcular posteriormente su situación observando puntos de los cuales se conocen sus coordenadas.

23.2.- PRINCIPIOS DEL LÁSER ESCÁNER

23.2.1.- El espectro electromagnético y la luz láser

Como vimos en el tema 21, el espectro electromagnético abarca las longitudes de onda de las ondas electromagnéticas, que varían desde las ondas largas de radio (sobre 100 metros) hasta los rayos gamma (10^{-12} metros). Cuanto menor es su longitud de onda mayor es su frecuencia y más energía contienen.

Un láser es un caso particular de onda electromagnética y tiene las siguientes características:

1. Coherencia: tiene la misma longitud de onda, o frecuencia única, luego es monocromática.
2. Se transmite en un haz paralelo y estrecho

Estas dos características se denominan coherencia temporal y espacial y permiten que el láser se emplee en la medición de distancias en topografía. La luz normal, por el contrario, está formada por múltiples longitudes de onda dispuestas al azar.

23.2.2.- Métodos de medición de la distancia

Los escáneres usados en topografía son escáneres activos y pueden medir la distancia de dos formas:

1. La primera, denominada “tiempo de vuelo”, consiste en emitir un pulso y contar el tiempo que tarda en volver. La distancia recorrida será el producto de la velocidad por el tiempo. De lo que se deduce que para tener una resolución de 1 mm el reloj debe de ser capaz de discernir tiempos de 3 picosegundos. La ventaja de este método es la concentración de energía que se consigue emitir en cada pulso y que permite que pueda medir distancias de centenares de metros.
2. La segunda consiste en medir la diferencia de fase entre la señal emitida y la recibida. Por ejemplo, si no existe desfase significa que la distancia entre el emisor y receptor está justo a una longitud de onda entera o múltiplo. A partir de ahí se puede calcular de forma indirecta el tiempo empleado mediante la fórmula:

$$Tiempo = \frac{DF}{2\pi x}$$

Siendo DF la variación de fase medida y x la frecuencia de la onda

Para hacernos una idea de las precisiones alcanzadas, si tenemos una longitud de onda de 100 metros y un fasímetro que mide precisiones de 0,01 grados (fácil de conseguir en electrónica) podemos medir distancias con errores de 3 mm. Este tipo de escáneres suelen usar varias longitudes de onda, las largas para medir distancias más grandes y aproximar la distancia y las pequeñas para alcanzar mejores precisiones. Este método permite medir más puntos por segundo con menores errores pero sus alcances suelen ser solo de decenas de metros.



Fig. 23.2. Escáner Leica ScanStation C5 de medición de tiempo de vuelo. Alcance: 300 m. Velocidad de 50.000 puntos/segundo



Fig. 23.3. Escáner Leica HDS 7000 de medición de fase. Alcance 150 m. Velocidad de 1.000.000 puntos/segundo

23.2.3.- Fuentes de error

Los errores en escaneado láser pueden proceder de distintas fuentes:

- La divergencia del haz a medida que se va alejando del punto emisor: este no incide sobre un punto sino sobre una superficie, por lo que pueden llegar a medirse diferentes distancias.
- La ambigüedad angular, ya que el rayo se dirige normalmente girando un espejo rotatorio: esto implica que un pequeño error provoque errores mayores conforme la distancia aumenta.

- Errores en la calibración de los ejes del instrumento: cuando los ejes vertical, horizontal y de colimación no son perfectamente perpendiculares entre ellos.
- Errores debidos al objeto sobre el que se mide: efectos de reflexión isotrópica, refracción o reflectividad desigual, absorción, objetos semitransparentes, etc.
- Los cambios de temperatura, presión y humedad atmosférica.
- Las variación de temperatura del propio objeto, lo que hace variar la relación señal/ruido y por consiguiente la precisión
- Hay distorsiones por movimiento: del propio escáner (dilataciones o vibraciones durante la medición) o del objeto que se mide.
- Y, en los casos en los que hay que enlazar varias tomas, los propios de las mediciones topográficas al calcular las coordenadas o bien de los centros del láser escáner o de los puntos de enlace comunes entre tomas.

23.3.- DESARROLLO DEL TRABAJO

23.3.1.- Planificación

La planificación de un trabajo requiere definir una serie de cuestiones: ¿cuál es el objeto que se desea escanear?, ¿para qué se necesita?, ¿cuáles son los productos finales que se desean?, ¿qué precisiones espaciales se requieren? No es lo mismo que el objetivo final sea obtener un modelado texturizado 3D, solo unas proyecciones 2D (alzados, plantas, secciones) o, simplemente, tener almacenada la nube de puntos (generalmente junto con fotografías) para conocer el patrimonio en posibles actuaciones futuras.

Estas cuestiones condicionan tanto el instrumento a emplear (precisiones, alcances, resoluciones, toma conjunta de fotos) como la metodología a aplicar (situación de las tomas, georreferenciación, enlaces entre estaciones) y el procesado de la información para obtener el producto. El modelado 3D texturizado es el producto más costoso, ya que requiere:

- limpiar la nube de puntos: hay que borrar los puntos fuera del modelo que buscamos.
- reducir el ruido: pequeños errores que se separan de la superficie que se está definiendo.
- reducir puntos en las zonas menos necesarias: los planos se definen con menos puntos que las zonas con más objetos y curvaturas.
- adaptar superficies o volúmenes a las nubes de puntos.
- y, finalmente, proyectar o recubrir con texturas: normalmente se utilizan fotografías del propio objeto.

Lo que nos permite este producto es generar automáticamente plantas, alzados, cortes, secciones, despieces o incluso videos con simulaciones de procesos constructivos y estudio de viabilidad de los pasos de ejecución.

23.3.2.- Trabajo de campo

Una vez definidos los objetivos que pretendemos alcanzar, debemos elegir el instrumental adecuado estudiando sus características técnicas. Lo primero es planificar las tomas, en las que tenemos que tener en cuenta:

- que debemos cubrir todo el objeto, cuidándonos de no dejar zonas de sombra.
- que la situación del escáner respecto al objeto, en cuanto a la distancia, no debe estar en el límite de su alcance (donde se producen los mayores errores).
- que debemos procurar que la huella del láser sobre el objeto sea la menor posible, es decir que la medición sea lo más perpendicular posible a la superficie a medir.
- que debemos definir en cada toma los parámetros del escaneo: zona a escanear y resolución del escaneo (puntos por unidad de superficie).

Estas decisiones no suelen ser fáciles en situaciones de espacios confinados o limitados. De igual modo hay que tener en cuenta las condiciones ambientales, como pueden ser temperaturas extremas, lluvia, o ambientes con vapor, y las posibles vibraciones o movimientos, por ejemplo en plataformas marinas debido al oleaje.

23.3.3.- Georreferenciación

Finalmente cualquier punto medido debe tener asignadas unas coordenadas absolutas. Para ello tenemos dos opciones:

1. Trabajar con el escáner orientado: se estaciona sobre un punto de coordenadas conocidas y se orienta (igual que una estación total); así los puntos tomados ya dispondrán directamente de coordenadas absolutas. Si realizamos todas las tomas de esta forma, al unir las diferentes nubes de puntos estas aparecen ya en el lugar buscado.
2. Se realizan las tomas en relativo, sin orientar: para trabajar de esta forma es necesario que entre ellas haya suficientes puntos en común y adecuadamente repartidos espacialmente. Estos puntos deben ser perfectamente identificables en ambas tomas, por eso se suelen colocar señales artificiales llamadas dianas que tienen una reflectividad alta y formas que permiten calcular su centro exacto. Las dianas se colocan de forma que no tapen el objeto que se desea medir. Para orientar el conjunto en coordenadas absolutas es necesario medir por métodos topográficos las coordenadas de dichos puntos del modelo. Existen dianas que incorporan antenas GNSS.

23.3.4.- Croquis de campo y notas

Es fundamental recopilar unas buenas anotaciones del trabajo realizado en campo. Estas anotaciones deben contener, como mínimo:

- croquis de la situación de las tomas del escáner, de las bases topográficas y de los puntos de apoyo tomados en el objeto (o de las dianas, si es el caso) con los nombres asignados.
- medidas realizadas para ayudar a la localización de los puntos anteriores: reseñas.
- también se deben anotar los metadatos: cómo se han ido nombrando los ficheros generados, quién ha realizado las diversas fases, cuándo las ha realizado, qué instrumental se ha usado (modelo y nº de serie, software, etc., condiciones de la observación).
- reportaje fotográfico de las fases de ejecución y los elementos implicados.



Fig. 23.4. Ejemplos de puntos de referencia (dianas) para enlazar estaciones.
Las dianas esféricas no es necesario orientarlas en cada escaneo

23.3.5.- Procesado de nubes de puntos

Los ficheros generados, que contienen la numerosa nube de puntos, suelen necesitar de gran cantidad de memoria por lo que se deben tratar con programas específicos que puedan importar y manipular dicha nube de forma eficiente.

Generalmente se empieza por eliminar todos aquellos puntos que estén fuera de la zona en la que nos interesa trabajar, por ejemplo mediante unos límites de coordenadas máximas y mínimas. Después se suele eliminar el ruido, es decir puntos que no están cerca de la superficie que buscamos debido a diferentes perturbaciones.

Una vez “limpiada” la nube se empieza a crear una malla entre los puntos para generar el modelo de caras 3D que aproximan mejor el objeto. En este apartado, si se sabe que el objeto tiene una forma geométrica concreta (por ejemplo tubos, esferas, prismas, etc.), se puede adaptar dicha superficie en el modelado. A partir de ahí se pueden generar cortes, secciones, vistas o animaciones 3D. Del mismo modo, hay que decidir cuál es el formato más adecuado para trabajar con el resultado final.

23.4.- EJEMPLO DE ESCANEO

Vamos a presentar muy esquemáticamente, mediante cuatro imágenes, un ejemplo realizado mediante la multiestación MS50 (Leica). Este instrumento integra una estación total robotizada más un láser escáner. Opcionalmente se le puede acoplar un GNSS en la parte superior para conocer sus coordenadas.

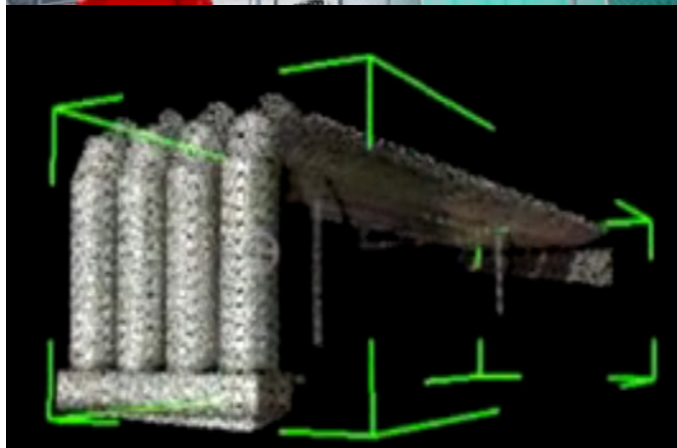
1) Tras estacionar el instrumento, se realizan tomas fotográficas del entorno. El primer paso es definirle a la multiestación, sobre las fotos obtenidas, la ventana de trabajo que vamos a escanear y la densidad de puntos deseada.



2) La multiestación realiza barridos verticales con el antejo, tomando columnas de puntos sucesivas en la zona anteriormente definida.



3) Los ficheros que contienen las nubes de puntos se descargan al software para orientarlos relativamente (en caso de no haberse tomado orientado en campo) para trabajar con un único fichero de puntos.



4) Finalmente se reconstruye el objeto y se le dan texturas para obtener un modelado 3D sobre el que ya se pueden realizar diferentes planos o visualizaciones multimedia.



Fig. 23.5. Ejemplo realizado mediante la multiestación MS50 (Leica)

