

## **Tema 12: Aplicaciones Topográficas del G.P.S**

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL
2. SISTEMA DE REFERENCIA Y PARAMETROS DE TRANSFORMACION
3. DESCRIPCION DEL SISTEMA GPS
  - SECTOR ESPACIAL
  - SECTOR DE CONTROL
  - SECTOR USUARIO
4. RECEPTORES GPS
  - 4.1 CLASIFICACIÓN
  - 4.2 DESCRIPCIÓN DEL RECEPTOR
  - 4.3 TRATAMIENTO DE LOS DATOS
5. OBSERVABLES GPS Y MEDIDA DE DISTANCIAS A SATELITES
  - 5.1 MEDIDAS DE CODIGO O PSEUDODISTANCIA
  - 5.2 MEDIDAS DE FASE
6. INCERTIDUMBRES EN OBSERVACIONES GPS
7. METODOS DE OBSERVACION GPS
8. PROYECTO DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO
  - 8.1 GEOREFERENCIACIÓN: TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA
  - 8.2 OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO
  - 8.3 RESULTADOS

- 9. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO EN RTK
  - 9.1 GEOREFERENCIACIÓN: TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA
  - 9.2 OBTENCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS
  - 9.3 EDICION CARTOGRAFICA
  
- 10. BIBLIOGRAFÍA

## 1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

GPS es la abreviatura de **Global Positioning System** y utiliza la constelación NAVSTAR, siendo el acrónimo en inglés de **NAV**igation **S**ystem for **T**ime **A**nd **R**anging, traducido como Sistema de Posicionamiento Global.

La metodología se basa en la determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre, apoyándose en la información radioeléctrica enviada por satélites.

El GPS es un sistema basado en satélites artificiales activos, formando una constelación con un mínimo de 24 de ellos. Permite diferentes rangos de precisión según el tipo de receptor utilizado y la técnica aplicada.

En 1957, en el Congreso de Toronto, surgió la idea del lanzamiento de satélites artificiales con objetivos geodésicos, para solventar la necesidad de intervisibilidad que exigía la geodesia clásica. Se planteaba determinar la posición absoluta de un punto por métodos semejantes a los utilizados con fotografías a satélites o con las observaciones a estrellas.

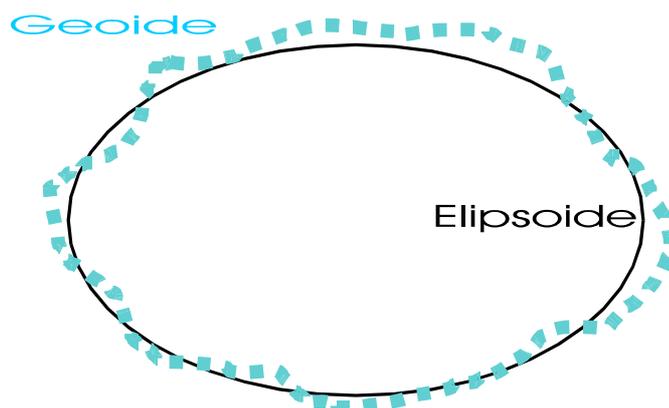
El sistema GPS ha sido desarrollado por el Departamento de Defensa Americano (DoD). La metodología nació con el objetivo de mejorar el sistema de satélites de navegación militar TRANSIT (efecto Doppler), muy usado en geodesia desde 1967 en todo el mundo. El primer satélite GPS data de 1978 y la fecha desde la que se considera en funcionamiento el sistema es enero de 1994.

El sistema de referencia asociado se conoce como *World Geodetic System* (WGS). El primer elipsoide global de referencia se estableció en 1960 y ha sido mejorado (1966, 1972) hasta su versión actual denominada WGS84 (definido en 1984). Sobre este sistema de referencia se obtienen las coordenadas cartesianas o polares del punto en el que se ha realizado la observación.

Al calcular la posición de un punto por métodos de posicionamiento GPS deberemos tener en cuenta que éstas lo son con respecto al Sistema geodésico de Referencia WGS84 y que han de hacerse las oportunas observaciones y transformaciones, que nos permitan obtener los resultados en el sistema de coordenadas deseado.

En altimetría la *ondulación del geoide* (N) es la distancia existente entre el elipsoide de referencia y el geoide, medida sobre la normal geodésica. Este es el parámetro que nos permitirá relacionar alturas elipsoidales y ortométricas.

Recordemos que el geoide es la superficie equipotencial del campo gravitacional que cubre por completo el globo, por debajo de la topografía continental, y que en cualquiera de sus puntos es perpendicular a la línea de plomada o dirección de la gravedad.



A principios de los años 70 se propuso el proyecto GPS, para satisfacer los requerimientos militares del gobierno de los Estados Unidos en la determinación de posiciones terrestres precisas sin importar las condiciones meteorológicas por las que estuviera afectado y bajo un sistema unificado de cobertura. Una vez consolidado militarmente dicho sistema, sus aplicaciones se extendieron para usos comerciales, divulgándose entre la comunidad científica. Las aplicaciones del sistema incluyen en la actualidad aplicaciones en navegación, topografía y geodesia abarcando desde la administración de una flota de vehículos hasta la automatización de maquinaria de construcción.

Frente al control del sistema GPS por parte del gobierno americano, la Unión Europea está desarrollando su propia constelación de satélites para disponer de un sistema de navegación propio. Este nuevo sistema se denomina GALILEO y el número de satélites será de 24 a 35. Además, existe un sistema semejante, llamado GLONASS, de patente rusa.

## 2. SISTEMA DE REFERENCIA Y PARAMETROS DE TRANSFORMACION

Al realizar observaciones GPS, las coordenadas obtenidas están referidas al sistema WGS84.

Para pasar estas coordenadas obtenidas mediante observaciones, al sistema de referencia local que se precise, tendremos que hacer una transformación de coordenadas.

Los parámetros de esa transformación son un total de siete, 3 traslaciones ( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ), 3 rotaciones ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ), y un factor de escala ( $\lambda$ ) y se obtiene a partir de puntos con coordenadas conocidas en el sistema inicial (WGS-84) y en el sistema final (local). También pueden realizarse transformaciones 2D, interpolaciones, ajustes plinómicos, aplicación de superficies de mínima curvatura, etc.

Este sistema local, que dependerá de la trascendencia de los datos, puede ser un puro sistema local generado a partir de unas coordenadas arbitrarias asignadas a un punto cualquiera, o puede tratarse, como generalmente ocurre, del sistema ED-50 definido como DATUM planimétrico en la cartografía oficial española.

A continuación se detallan ambos sistemas, habitualmente empleados en trabajos topográficos por técnicas GPS.

### SISTEMA WGS84

El sistema convencional de referencia terrestre (CTRS) adoptado para el posicionamiento GPS es el denominado World Geodetic System 1984 (WGS84) que viene definido por:

- Origen en el geocentro.
- Eje Z paralelo a la dirección del Polo terrestre Convencional Internacional (CIO), posición del polo medio época 1984.0
- El eje X es la intersección del plano meridiano de referencia y el plano del ecuador astronómico medio.
- El eje Y, situado en este plano, constituye con X,Z un sistema coordenado rectangular dextrógiro.

Los valores de las constantes son:

- Semieje mayor:  $a = 6378137$  metros.
- $1/f = 298,257223563$
- Constante gravitacional:  $GM = 3986004,418 * 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$ .
- Velocidad de rotación:  $w = 7292115 * 10^{-11} \text{ rd/s}$ .

### SISTEMAS DE REFERENCIA LOCALES

Todas las redes geodésicas están calculadas sobre un sistema de referencia geodésico definido por:

- Elipsoide de referencia.
- Punto Astronómico fundamental (donde coinciden la vertical astronómica y la geodésica).
- Origen de longitudes y latitudes.
- Origen de altitudes.

A este conjunto de datos, que nos permiten identificar un sistema coordenado, se le conoce por DATUM.

Para poder utilizar las observaciones GPS deberemos pasar del sistema WGS84 al sistema geodésico local. En el caso de España este sistema emplea el Datum horizontal ED50 definido por:

- Elipsoide de Haydford.
- Punto fundamental Potsdam.
- Longitudes referidas al meridiano de Greenwich.

Como Datum vertical se utiliza:

- Altitudes referidas al geoide (datum en Alicante).

El primer problema se plantea en las altitudes. Las observadas mediante técnicas GPS, son altitudes elipsoidales referidas al elipsoide WGS84 mientras que las altitudes del marco de referencia RED-50 cuentan con altitudes ortométricas referidas al Datum vertical de Alicante, utilizando como superficie de referencia el geoide. Para pasar de un sistema a otro, deberemos conocer la ondulación del geoide  $N$  respecto al elipsoide medida sobre la normal al elipsoide.

## PARAMETROS DE TRANSFORMACION

Para calcular los parámetros de transformación de un sistema a otro necesitamos conocer los valores de las coordenadas en ambos sistemas de un mínimo de 3 puntos.

Estos 3 puntos nos generan 9 ecuaciones (3 por punto, una en cada eje) para la resolución de las 7 incógnitas que buscamos ( $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, \lambda$ ), siendo dos los grados de libertad.

Calculados los parámetros de transformación entre dos sistemas de coordenadas podremos convertir las coordenadas de otros puntos de un sistema a otro, según las necesidades del trabajo.

### 3. DESCRIPCION DEL SISTEMA GPS

SECTOR ESPACIAL

SECTOR DE CONTROL

SECTOR USUARIO

El sistema GPS consta de tres sectores: los satélites, el sistema de control terrestre de los mismos, y los receptores de usuario que recogen las señales enviadas por los satélites y determinan las coordenadas del punto sobre el que se encuentran.

En la aplicación de la metodología GPS se diferencian esos tres elementos.

#### 3.1 SECTOR ESPACIAL

Está compuesto por la constelación de satélites NAVSTAR (Sistema de Navegación para Tiempo y Distancia) los cuales transmiten: señal de tiempos sincronizados, parámetros de posición de los satélites, información del estado de salud de los satélites sobre las dos portadoras y otros datos adicionales.

La constelación actual consta de entre 27 y 31 satélites distribuidos en seis órbitas con 4 ó más satélites en cada una. Los planos orbitales tienen una inclinación de 55 grados y están distribuidas uniformemente en el plano del ecuador. Con una órbita de 12 horas sidéreas, un satélite estará sobre el horizonte unas cinco horas. El objetivo es que al menos 4 sean visibles al mismo tiempo, a cualquier hora del día y desde cualquier punto de la superficie terrestre.

Los lanzamientos se llevaron a cabo en dos generaciones. De la primera de ellas, Bloque I, ya no quedan satélites operativos pues la vida media de los satélites era de 6-7 años. Todos los satélites actuales pertenecen al Bloque II-A, II-F y II-R.

La altitud de los satélites es de unos 20100 Km. a su paso por el zenit del lugar. Orbitan con un periodo de 12 horas sidéreas por lo que la configuración de un instante se repite el día anterior con una diferencia entre día sidéreo y día solar medio ( $3^m 56^{seg}$ ).

Los seis planos orbitales se definen con las letras A,B,C,D,E,F y dentro de cada órbita cada satélite se identifica con los números 1,2,3,4,5. Así cada satélite está perfectamente identificado, existiendo diversas formas de hacerlo:

1. Por el número de lanzamiento del satélite o número NAVSTAR (SVN)
2. Órbita a la que pertenece y número de posición dentro de ella
3. Número de catálogo NASA
4. Identificación Internacional: año de lanzamiento, día juliano, tipo
5. Número IRON. Número aleatorio asignado por NORAD.
6. Código Seudo Aleatorio (PRN).

El sistema usual de identificación es por el Código Seudo Aleatorio del satélite.

Un satélite pueda quedar fuera de servicio civil por avería o envejecimiento de los paneles solares, falta de capacidad de los acumuladores, averías no conmutables de los sistemas electrónicos, agotamiento del combustible de maniobra o por intereses militares.

La información temporal y de posición están íntimamente relacionadas. El sistema GPS se basa fundamentalmente en la medida del tiempo de la forma muy precisa. Para ello los satélites contienen varios osciladores de alta precisión, con estabilizadores de máxima precisión capaces de dar medidas del tiempo del orden de  $10^{-12}$ , y de  $10^{-14}$  en los de última generación (bloque III, todavía no operativo).

Una referencia de tiempos defectuosa afecta al conjunto de la información del receptor. La escala de tiempo se denomina GPS Time, siendo la unidad el segundo atómico Internacional. El origen de la escala GPS se ha fijado como coincidente con el UTC a las 0 horas del día 6 de enero de 1980. El tiempo universal coordinado UTC es un tiempo atómico uniforme, cuya unidad es el segundo atómico (se trata de un híbrido entre tiempo atómico y tiempo universal).

### Señal de los satélites

Cada satélite va provisto de un reloj-oscilador que provee una frecuencia fundamental sobre la que se estructura todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite.

Los satélites poseen una serie de antenas emisoras que funcionan en la banda L del espectro electromagnético, que son las que recibiremos en nuestros receptores. El satélite emite información sobre dos movimientos ondulatorios que actúan como portadoras de códigos, la primera se denomina L1. La segunda se denomina L2. El poder utilizar las 2 frecuencias permite determinar por comparación de la diferencia de retardos, el retardo ionosférico, difícilmente predecible por otros sistemas.

Sobre estas dos portadoras se envía una información modulada compuesta por tres códigos y un mensaje de navegación, generados también a partir de la frecuencia fundamental correspondiente

El primer código que envían es el llamado código C/A (*coarse /acquisition*) y ofrece precisiones que en la actualidad oscilan entre los 3m y los 10 m, y el segundo es el código P (*precise*) con precisiones métricas. Estos códigos son usados para posicionamientos absolutos, en navegación; y el tercero L2C de precisión similar al C/A.

En cuanto al mensaje, éste consta de 1500 bits, correspondientes a 30 segundos. Está dividido en 5 celdas. En cada celda encontramos información relativa a:

- |            |  |
|------------|--|
| CELDA 1    | Parámetros de desfase del reloj y modelo del retardo ionosférico y troposférico. |
| CELDAS 2-3 | Efemérides de los satélites.   |
| CELDA 4    | Aplicaciones militares.  |
| CELDA 5    | Almanaque.   |

Sobre la L1 se suelen modular los dos códigos vistos, el C/A y el P además del mensaje correspondiente. En la L2 sólo se modula también el mensaje de

navegación además de los códigos L2C y P.

### 3.2 SECTOR CONTROL

La misión de este sector consiste en el seguimiento continuo de los satélites, calculando su posición, transmitiendo datos y controlando diariamente todos los satélites de la constelación NAVSTAR. Había 5 centros: Colorado, Hawaii, Kwajalein, Isla de Ascensión e Isla de Diego García. Desde 1995 hay 10 estaciones monitoras.

Todas ellas reciben continuamente las señales GPS con receptores bifrecuencia provistos de relojes de H. También se registra una extensa información entre la que cabe destacar:

- Influencia que sobre el satélite tiene el campo magnético terrestre.
- Parámetros sobre la presión de la radiación solar.
- Posibles fallos de los relojes atómicos.
- Operatividad de cada uno de los satélites.
- Posición estimada para cada uno de los satélites dentro de la constelación global

Todos estos datos se transmiten a la estación principal situada en Colorado Spring (USA) donde se procesa la información, obteniendo de esta manera todas las posiciones de los satélites en sus órbitas (sus efemérides) y los estados de los relojes que llevan cada uno de ellos para que con posterioridad los mismos satélites radiodifundan dicha información a los usuarios potenciales.

### 3.3 SECTOR USUARIO

Este segmento del sistema GPS varía según la aplicación que se esté tratando. Está formado por todos los equipos utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites, así como por el software necesario para la comunicación del receptor con el ordenador, y el postprocesado de la información para la obtención de los resultados.

Hemos de tener en cuenta que el sistema GPS fue creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines exclusivamente militares y por ello el objetivo principal del GPS es el posicionamiento de vehículos y tropas militares en cualquier parte del mundo.

Las primeras aplicaciones civiles llegaron de la mano de la Navegación, en lo que hoy conocemos como gestión y control de flotas.

## 4. RECEPTORES GPS

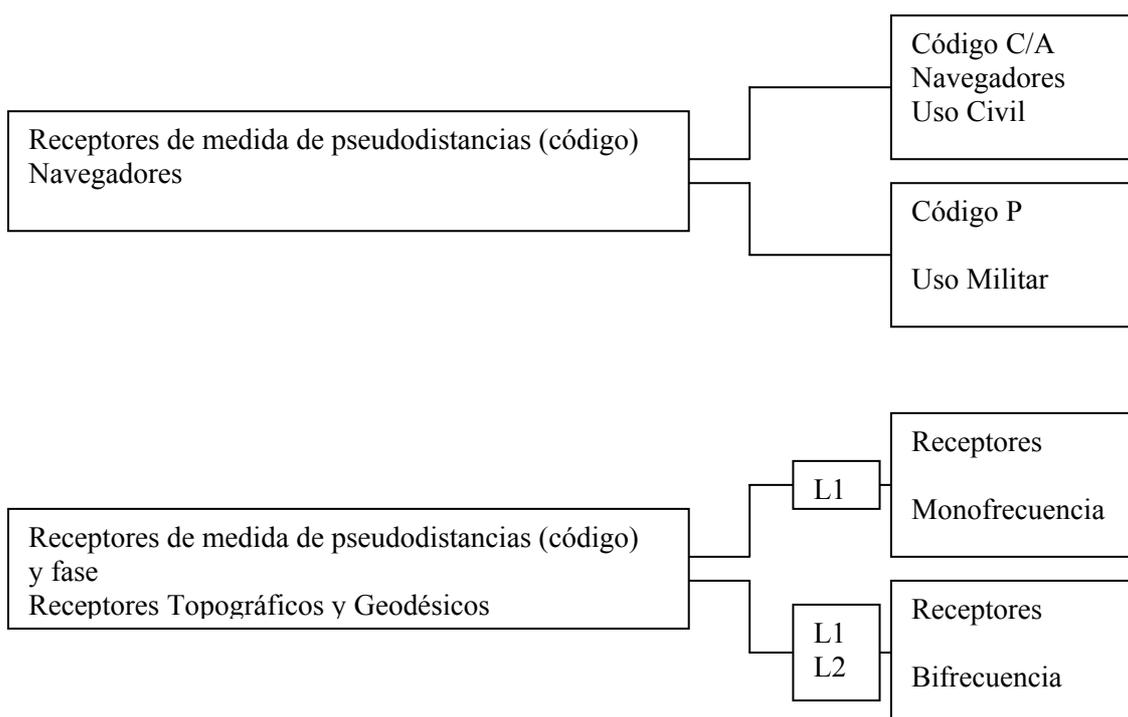
- 4.1 CLASIFICACIÓN
- 4.2 DESCRIPCIÓN DEL RECEPTOR
- 4.3 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

### 4.1 CLASIFICACIÓN

Si los clasificamos en función del observable que emplean para determinar la posición del punto distinguimos entre receptores de medida de pseudodistancias (código), que son los navegadores, y los receptores de medida de pseudodistancias y fase (receptores topográficos y geodésicos).

Los receptores también se pueden clasificar en receptores que registran la frecuencia L1 (código C/A), o bien registran conjuntamente las frecuencias L1 y L2 (receptores bifrecuencia).

Un esquema general (cuando el sistema *Anti-Spoofing* está activado) sería el siguiente:



La principal diferencia entre unos equipos GPS y otros, atiende a la precisión que permiten alcanzar:

- NAVEGADORES

Únicamente reciben datos de código C/A por la portadora L1. Correlacionan el código y determinan la pseudodistancia entre el receptor y satélite, dando como resultado final coordenadas tridimensionales de la situación geográfica del receptor (X, Y, Z), en el Sistema Geodésico WGS-84

Son simples receptores GPS muy sencillos en su uso y de bajo precio. Funcionan autónomamente y consiguen precisiones por debajo de los 10 metros (sin Disponibilidad Selectiva SA-*Selective Availability*).

- GPS SUBMETRICOS

Son equipos GPS que reciben los mismas observables que los anteriores. Difieren de los anteriores al trabajar diferencialmente, un equipo de referencia y otro móvil en modo cinemático o en modo estático. Se trata de los equipos anteriores con admisión de correcciones.

Las precisiones que se pueden conseguir se encuentran por debajo de 1 metro, en función del tipo de receptor y los algoritmos de cálculo. Las aplicaciones se encuadran en los campos de la cartografía y GIS



Receptor GPS monofrecuencia de código.

- GPS MONOFRECUENCIA DE CODIGO Y FASE

Estos receptores toman datos de la portadora L1 en sus dos modalidades código C/A y fase. Son equipos que trabajan en modo diferencial en tiempo real y en diferido (post-proceso). La precisión aumenta considerablemente respecto a los anteriores siendo de 1cm. + 2ppm., lo que nos permite utilizarlo en aplicaciones Topográficas.

Otras de sus características son:

- ✓ Opción menos cara.
- ✓ Limitación de líneas menores a 15-20 kilómetros.
- ✓ Tiempos altos de observación.
- ✓ Con o sin opción RTK.
- ✓ Utilizado en trabajos topográficos como densificaciones de redes, apoyos fotogramétricos, levantamiento de puntos...

- GPS DOBLE FRECUENCIA

Son los equipos de mayor precisión, y se utilizan en aplicaciones Topográficas y Geodésicas. Toman observables de las dos portadoras emitidas por los satélites, realizando medidas de código C/A y P en L1, de código P y L2C en L2, y medidas de fase en L1 y L2.



Trabajan en tiempo real o en post-proceso alcanzando precisiones del orden de 5mm.+1ppm y disminuyendo los tiempos de observación.



Se utilizan en redes topográficas y geodésicas, redes de

control de deformaciones y control fotogramétrico, con tiempos de observación más cortos que en el caso anterior y distancias mayores de 20 km.

A continuación exponemos un cuadro comparativo de los diversos tipos de receptores GPS:

METODO	FRECUENCIA	OBSERVABLES	PRECISION	APLICACIONES
ABSOLUTO	L1	COD.C/A	$\pm 10$ m	NAVEGACION
DIFERENCIAL	L1	COD. C/A	1 m	CARTO/GIS
DIFERENCIAL	L1	C/A Y FASE	1cm + 2ppm	TOPOGRAFIA
DIFERENCIAL	L1 Y L2	C/A,P,FASE	5mm + 1ppm	TOPO/GEO

## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL RECEPTOR

Los equipos que se utilizan de las aplicaciones topográficas y geodésicas constan de los siguientes elementos:

- ANTENA GPS: Recibe y amplifica la señal recibida de los satélites.
- RECEPTOR GPS: Ordenador que decodifica la señal recibida por la antena y registra las observaciones
- TERMINAL: Es un *interface* de usuario que permite conocer el estado de la recepción, proceso de cálculo, y llevar a cabo la edición de los datos del receptor.



La antena es el elemento al cual viene siempre referido nuestro posicionamiento, está conectada a través de un preamplificador al receptor, directamente o mediante cable. La misión de la antena es la de convertir la energía electromagnética que recibe en corriente eléctrica que a su vez pasa al receptor.

El receptor GPS consta de una serie de elementos que se encargan de la recepción de las radiofrecuencias enviadas por los satélites. Además suelen poseer diferentes canales para seguir simultáneamente a varios satélites, un procesador interno con su correspondiente soporte lógico, una unidad de memoria para el almacenamiento de la información, teclado de control, pantalla de comunicación con el usuario, diferentes conectores para funciones varias y una fuente de alimentación interna o externa.

Por último, también se emplean trípodes, cables especiales, equipos de control meteorológico y diverso material auxiliar.

Una vez estacionados en el punto requerido y con el equipo completo en funcionamiento, el receptor puede ofrecer al operador, a través de la pantalla y con ayuda del teclado, una gran cantidad de información sobre la observación que estamos realizando:

- Satélites en seguimiento.
- Acimut de cada satélite en seguimiento.
- Elevación de cada satélite en seguimiento.
- Nuestra posición aproximada actual. (longitud, latitud y altitud).
- Dirección y velocidad del movimiento, para navegación.
- Bondad de la geometría de observación.
- Bondad de la medida que puede hacerse sobre cada satélite.
- Edad o antigüedad de la información ofrecida.
- Progreso de la observación: satélites que se pierden y captan, y número de observaciones realizadas a cada uno.
- Nombre y número de la sesión que damos a la estación de observación, así como la identificación del operador y notas varias.
- Registros meteorológicos y datos locales introducidos.
- Estado de la fuente de alimentación.
- Otra información adicional.

El desarrollo de la tecnología GPS está orientado hacia la mejora en el seguimiento de satélites, la disminución de efectos multipath con complejos algoritmos de cálculo y la creación de equipos más compactos, pequeños y ligeros integrados en las estaciones totales tradicionales.

### **4.3 TRATAMIENTO DE LOS DATOS**

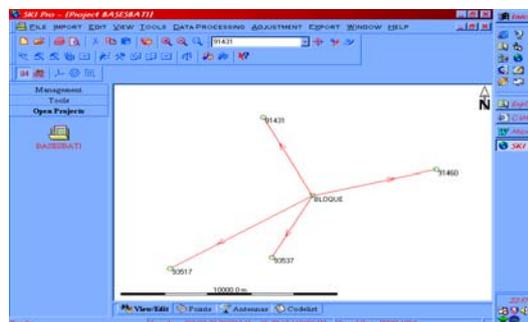
Para el tratamiento de los datos generalmente es necesario utilizar un programa informático específico, según la marca del instrumental, aunque cada vez es más frecuente mezclar la información registrada con diferentes receptores, y tratarla con diferentes programas. En programa de tratamiento de datos en general consta de los siguientes módulos:

- Planificación de observaciones
- Descarga de datos, incluidos los ficheros universales RINEX.
- Gestión de proyectos, como unidades de trabajo.
- Resolución de "Ambigüedades", calculando las línea-bases.
- Visualizar y editar los datos GPS definitivos.
- Ajuste de los datos redundantes.
- Cálculo de la transformación del sistema WGS-84 al sistema local.
- Edición de las coordenadas definitivas.

Como ejemplo mostramos el programa SKI-Pro de la casa Leica:



Software de Gestión de la firma Leica.



Visualización de línea-bases

## 5. OBSERVABLES GPS Y MEDIDA DE DISTANCIAS A SATELITES

### 5.1 MEDIDAS DE CODIGO O PSEUDODISTANCIA

### 5.2 MEDIDAS DE FASE

El GPS es un sistema que permite obtener la posición de un punto midiendo las distancias existentes entre las antenas emisoras de los satélites y la antena receptora del equipo de campo.

Existen dos métodos fundamentales: mediante pseudodistancias (ó código) o por medidas de fase. En ambos casos el objetivo es la determinación de la distancia entre la antena GPS y el satélite del que recibe la señal.

Calculando la distancia como mínimo a tres satélites e intersectando inversamente en el espacio podremos determinar las coordenadas de la antena receptora, si el reloj del satélite y el reloj del receptor estuviesen sincronizados, en la práctica son necesarios 4 satélites para resolver con el cuarto la incógnita del estado del reloj. La precisión de dichas coordenadas dependerá del tipo de observaciones realizadas y de la metodología empleada en el posicionamiento. Por otra parte la metodología nos permite corregir parte de los errores que afectan a la precisión.

Las observables de tiempo (códigos) son:

- Código C/A modulado sobre L1.
- Código P modulado sobre la portadora L1.
- Código P modulado sobre la portadora L2.
- Código L2C modulado sobre la portadora L2.

Observaciones de diferencia de fase:

- Diferencia de fase de la portadora L1.
- Diferencia de fase de la portadora L2.

### 5.1 MEDIDAS DE CODIGO O PSEUDODISTANCIA

Para la solución geométrica son suficientes las mediciones de distancia a cuatro satélites, uno por cada incógnita (XYZ, tiempo).

Esa distancia desde el receptor al satélite se determina por medio de una medición del tiempo de propagación del código C/A, L2C o del código P (este último de la portadora L1 o de la portadora L2).

El satélite transmite un impulso (código), este impulso contiene información adicional del instante de emisión. En el receptor se mide el momento de llegada del impulso y se lee la información contenida sobre el instante de emisión. La diferencia de tiempo multiplicada por la velocidad de propagación de la señal nos permite obtener la distancia. Esta medida se denomina "pseudodistancia".

El tiempo del retardo nos permite calcular una distancia que no es precisamente la existente, ya que no conocemos el estado del reloj del receptor, de ahí que el valor hallado no sea una distancia real sino una pseudodistancia.

El método de pseudodistancias es propio de la técnica GPS. Se trata de una auténtica multilateración tridimensional que sitúa a la estación de observación, en la intersección de las esferas con centro en el satélite y radio correspondiente a la distancia entre las antenas de los satélites y el receptor, medida por este.

La pseudodistancia se podría definir como el desplazamiento temporal necesario para correlar una réplica del código GPS, generado en el receptor, con la señal procedente del satélite y multiplicado por la velocidad de la luz. Por tanto el observable es un tiempo.

La precisión de posicionamiento que nos ofrece este método es de aproximadamente un 1% del periodo entre sucesivas épocas de un código (se suele denominar longitud del chip). Así para el código P, cuyas épocas son de 0,1 microsegundo (por lo que la precisión de medida será de 1 nanosegundo), al multiplicar dicho factor por la velocidad de la luz, obtendremos una precisión de distancia de 30 cm. en tiempo real. Para el código C/A, cuya precisión es diez veces menor a la del código P, y obtendremos unos errores de unos 3 m.

### 5.2 MEDIDAS DE FASE

La determinación de la distancia por este tipo de medida se puede comparar a la metodología empleada por un distanciómetro.

El satélite genera una onda con una determinada frecuencia (L1 o L2) en un instante y el receptor genera esa misma onda en ese mismo instante. El receptor compara la onda recibida con la generada y mide el desfase entre ambas así como la variación de este desfase en el tiempo. Para determinar la distancia exacta nos falta conocer el valor inicial del número entero de longitudes de onda (N o "ambigüedad inicial de fase") entre el satélite y el receptor que se mantendrá constante en el tiempo y después de un tiempo continuado de observación.

El método de medidas de fase es el que permite obtener mayor precisión. Su fundamento es el siguiente: partiendo de una frecuencia de referencia obtenida del oscilador que controla el receptor, se compara con la portadora demodulada

que se ha conseguido tras la correlación, controlándose así, en fase, la emisión radioeléctrica realizada desde el satélite con frecuencia y posición conocidas. Cuando esta emisión llega a la antena, su recorrido corresponde a un número entero de longitudes de onda (denominado  $N$  o "ambigüedad inicial de fase") más una cierta parte de longitud de onda cuyo observable (o momento exacto de recepción por parte de la antena) puede variar entre  $0$  y  $360^\circ$ . Tenemos pues, una frecuencia y cierta parte de la longitud de onda conocidas, y la ambigüedad (Número entero de las longitudes de onda) por conocer. La resolución de la ambigüedad se realiza en base a un extenso proceso de cálculo, que además nos resolverá el estado de los relojes y por supuesto, los incrementos de coordenadas entre estaciones. Una vez obtenidos dichos valores, la resolución interna que nos proporcione el sistema, aunque diversas fuentes de error limiten la precisión operativa a algún centímetro o incluso menos, siempre en función de las técnicas de observación empleadas.

Debe destacarse que es fundamental en el sistema no perder el seguimiento de la fase para que la ambigüedad inicial no pueda variar. Si hay alguna pérdida de recepción por cualquier causa, la lectura de la diferencia de fase se rompe (*Cycle Slip*), y con ello aumenta el número de ambigüedades del sistema. Esta pérdida de ciclos puede ocurrir por muchas causas desde disturbios ionosféricos a obstrucciones físicas importantes (edificios, etc.). Podremos comprender, entonces, la dificultad de trabajar en zonas próximas a arbolados, tendidos eléctricos, torres, edificios, etc., limitando las aplicaciones de éste método en tiempo real.

## 6. INCERTIDUMBRES EN OBSERVACIONES GPS

Los parámetros que van a condicionar en gran medida las precisiones que podamos obtener con el sistema GPS, y por lo tanto las **fuentes de error** posibles pueden deberse a los satélites, al medio de propagación de la señal o a los receptores. Destacamos las siguientes:

- Tiempo (relojes)

Dado que en la información que nos llega de los satélites, estos nos transmiten el tiempo exacto en el que empezaron a emitir su mensaje codificado, y que los receptores miden, también, el tiempo exacto en el que recibieron cada señal, podremos calcular una medida de distancia entre el receptor y el satélite, conociendo la velocidad de propagación de la onda y el tiempo transcurrido desde que se emitió la señal hasta que fue recibida. El problema surgirá cuando los relojes del satélite y el receptor no marquen el mismo tiempo, de tal manera que un microsegundo de desfase se traduce en un error de 300 metros en la medición de la distancia.

- Ionosfera

La ionosfera es la región de la atmósfera que se sitúa aproximadamente entre 50 y 1000 kilómetros sobre la superficie de la tierra. Posee la particularidad de que los rayos ultravioletas procedentes del sol ionizan las moléculas de gas que allí se encuentran liberando electrones, produciendo de esta forma una dispersión no lineal en las ondas electromagnéticas enviadas por los satélites. Cada onda se decelera en un ritmo inversamente proporcional al cuadrado de su frecuencia.

La manera utilizada para eliminar esta fuente de error consiste en comparar la información que recibimos utilizando las dos portadoras, L1 y L2 (receptores bifrecuencia), mediante la combinación de observables; o trabajar con un límite de distancias entre vértices inferiores a 20 km.

- Troposfera

Estos errores se cometen cuando se produce una refracción de las ondas según las distintas condiciones meteorológicas de temperatura, presión y humedad relativa del aire, que encuentra a su paso.

Para eliminar estos errores se aplican modelos troposféricos ya establecidos, o mediante algoritmos de estimación del retardo troposférico.

- Efecto Multitrayectoria

Se produce cuando la onda sufre reflexiones, choques contra objetos reflectantes en su camino hacia la antena.

Para reducir este efecto se requiere disponer de antenas con planos de tierra y sobre todo poner un especial cuidado en el emplazamiento de la misma.

Para parametrizar la precisión de la geometría de los satélites se define el concepto de **Indicador de la Precisión** (DOP-*Dilution Of Precision*). Permite cuantificar la fortaleza

de la geometría de los satélites y está relacionada con la distancia entre estos y su posición en el espacio.

El factor DOP, refleja la configuración geométrica de los satélites, como coeficiente entre la incertidumbre de precisión a priori y la incertidumbre de precisión a posteriori. Una mala distribución de satélites ocasiona una alta incertidumbre en la posición. Cuando los satélites están bien distribuidos, la incertidumbre en la determinación de la posición es menor.

Si los satélites están muy cerca unos de otros, se incrementa también la incertidumbre en la posición.

Se pueden calcular diferentes tipos de Dilución de la Precisión:

**VDOP** – *Dilución Vertical de la Precisión*. Incertidumbre en altura (vertical). Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección vertical.

**HDOP** – *Dilución Horizontal de la Precisión*. Incertidumbre 2D (horizontal). Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección horizontal.

**PDOP** – *Dilución de la Precisión en Posición*. Incertidumbre 3D. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D.

**TDOP** – *Dilución de la Precisión en Tiempo*. Incertidumbre en tiempo.

**GDOP** – *Dilución de la Precisión Geométrica*. Incertidumbre 3D y de tiempo. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D y en tiempo.

El valor DOP más útil es el GDOP, ya que es una combinación de todos los factores. Sin embargo, algunos receptores calculan el PDOP o HDOP, valores que no toman en consideración el componente de tiempo.

La mejor manera de minimizar el efecto del GDOP es observar tantos satélites como sean posibles. No obstante hay que recordar que las señales de satélites con poca elevación generalmente tienen una gran influencia de las fuentes de error.

Como regla general, cuando se utilice el GPS para topografía, lo mejor es observar satélites con un ángulo de elevación superior a 15° sobre el horizonte. Las posiciones más precisas se calculan cuando el GDOP tiene un valor bajo, generalmente menor que 8.

Las precisiones iniciales conseguidas en el posicionamiento estándar (SPS) con el sistema GPS superaban con creces las expectativas. Este tipo de posicionamiento estaba a la altura del posicionamiento preciso (PPS) ofreciendo hasta 10 metros de precisión. Para degradar los valores obtenidos con SPS, el Departamento de Defensa Americano puso en marcha la **Disponibilidad Selectiva (SA)**, que actuaba sobre la información que enviaban los satélites en el mensaje, modificando los parámetros orbitales y el estado de los relojes. Con la disponibilidad selectiva activa las precisiones alcanzables eran de 15 a 100 metros. Se desactivó el 1 de Mayo de 2000, quedando el sistema GPS a libre disposición, sin distorsiones intencionadas de las señales.

Este concepto de Disponibilidad Selectiva (SA), consiste en alterar intencionadamente la señal de los satélites para controlar el uso civil del sistema. Era aplicado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos a la señal GPS, sometiendo a los relojes del satélite a un proceso conocido como "dithering" (dispersión), que altera ligeramente el tiempo. Y alterando la transmisión de las efemérides (o la trayectoria que seguirá el

satélite). El factor SA afectaba a los usuarios civiles que utilizaban un solo receptor GPS para obtener una posición absoluta. Los usuarios de sistemas diferenciales no se veían afectados de manera significativa por este efecto.

El resultado final supone una degradación en la precisión de la posición, y si bien el efecto SA está desactivado desde el 1 de mayo de 2000, deberá tenerse en cuenta de nuevo en el caso de que volviera a activarse.

Otro efecto a considerar es el denominado **efecto Anti-Spoofing** (50-400 m), que también es una distorsión intencionada del código P. Ha sido concebido con la idea de no permitir que otros usuarios tengan acceso al código P de la señal GPS, obligándoles a emplear el código C/A. El efecto Anti-spoofing encripta el código P en una señal conocida como código Y. Sólo los usuarios con receptores GPS militares (EEUU y sus aliados) pueden descifrar el código Y. Los receptores militares son más precisos porque no utilizan el código C/A para calcular el tiempo que tarda en llegar la señal desde el satélite al receptor GPS. Únicamente emplean el código P.

El código P modula a la portadora con una frecuencia de 10,23 Hz., mientras que el código C/A lo hace a 1,023 Hz. Las distancias se pueden calcular con mayor precisión empleando el código P, ya que este se transmite 10 veces más por segundo que el código C/A.

Los usuarios de receptores GPS militares generalmente obtendrán precisiones del orden de 5 metros, mientras que los usuarios de equipos GPS civiles equivalentes únicamente alcanzarán precisiones de 10 metros sin SA, o un poco mejores.

Algunos de estas variables pueden controlarse. Por ejemplo el sesgo del oscilador de los satélites puede evitarse mediante las correcciones enviadas por las estaciones de seguimiento, el sesgo orbital mediante las efemérides calculadas a posteriori (efemérides precisas) y el retraso ionosférico mediante la utilización de dos frecuencias y el proceso diferencial

El efecto multipath se evita situando la antena de tal forma que evitemos este tipo de ondas y nos serviremos de planos de tierra si es preciso. En la actualidad existe un *firmware* de seguimiento en los equipos que evita la recepción de este tipo de ondas. Los errores debidos al oscilador del receptor los resolveremos observando diferencialmente.

La incertidumbre introducida en la posición por las variables mencionadas que afectan a la observación GPS, se considera que puede tomar los siguientes valores (en metros):

Causa	GPS autónomo	Diferencial
Reloj del Satélite	1.5	0
Error orbital	0.5	0
Ionosfera	5-50	0.4
Troposfera	0.5	0.2
Ruido del receptor	0.3	0.3
Multipath	0.6	0.6
SA	30	0
Precisión típica	GPS autónomo	Diferencial
Horizontal	50	1.5
Vertical	78	2.0
3-D	93	2.8

## 7. METODOS Y APLICACIONES DE POSICIONAMIENTO GPS

Existen distintos criterios a la hora de clasificar los métodos de observación o posicionamiento GPS. Se pueden clasificar según distintos factores:

- Según el Sistema de Referencia:
  1. Absoluto  
Se calcula la posición de un punto utilizando las medidas de pseudodistancias por código (C/A, L2C o P) con un solo receptor. La precisión del método está en menos de 10 metros (función del código utilizado).
  2. Relativo o Diferencial  
Es necesario observar al menos con dos equipos simultáneamente. Las mediciones se pueden hacer por código o por fase. Se determina la distancia o incremento de coordenadas entre las antenas de los receptores (diferencia de posición entre ellos). A este método se le suele denominar diferencial. La gran ventaja de este método radica en que los errores de posicionamiento, muy similares en ambos puntos, son eliminados en su mayor parte.
- Según el Movimiento del Receptor:
  1. Estático  
Se determina un único trío de coordenadas (X, Y, Z) directamente o ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) si el posicionamiento es diferencial, de una antena a partir de una serie de observaciones realizadas durante un periodo de tiempo en el que no se sufren desplazamientos superiores a la precisión del sistema. Existe redundancia en la observación.
  2. Cinemático  
Se determina el conjunto de coordenadas (X, Y, Z) directamente o ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) si el posicionamiento es diferencial, en función del tiempo y la situación de la antena, la cual estará en movimientos superiores a la precisión del sistema. No hay redundancia en las coordenadas del punto determinado, por tanto, se obtiene sin redundancia las coordenadas de un punto a partir de una muestra única de datos o época.
- Según el Observable Utilizado:
  1. Medida de código  
Se determina a partir de pseudodistancias entre el satélite y el receptor mediante la utilización del código de la portadora. Se puede medir el código C/A (accesible para cualquier usuario) y L2C, o el código P (más preciso, pero normalmente encriptado).
  2. Medida de fase de la portadora  
Se utiliza la fase de la portadora para realizar la medida de la pseudodistancia. Requiere trabajar en modo diferencial o relativo.
- Según el Momento de la Obtención de Coordenadas:
  1. Tiempo Real (Real Time – RT)

Las coordenadas del receptor, móvil o estático, se obtienen en tiempo real, es decir, en el momento de la observación. La precisión es función del observable utilizado (código o fase) y del método utilizado, absoluto o relativo.

## 2. Postproceso

Las coordenadas del receptor, móvil o estático, son obtenidas en postproceso, es decir, una vez finalizada la observación se calculan las posiciones en gabinete (lo que permite trabajar con efemérides más precisas). Este método se suele utilizar para posicionamiento estático relativo. En el caso de posicionamiento estático relativo con medida de fase se obtienen soluciones más precisas que en tiempo real.

A partir de la combinación de estos métodos puros surgirán los distintos métodos de observación propiamente dichos:

- Estático Absoluto (pseudodistancias).
- Cinemático Absoluto (pseudodistancias).
- Estático Relativo (pseudodistancia y fase)
  1. Estándar
  2. Rápido
- Cinemático relativo (pseudodistancia y fase)
  1. Cinemático (postproceso).
  2. RTK (fase, tiempo real, Real Time Kinematic).
  3. RT-DGPS (código, Real Time Diferencial GPS)

Para el caso de la topografía y geodesia todas las medidas GPS utilizarán el modo diferencial o relativo. Es decir, se mide una línea base (o base línea), desde un punto fijo (estación de referencia con coordenadas conocidas) a un punto desconocido (móvil o "rover").

A continuación se explican los principales métodos de posicionamiento GPS aplicados en Topografía y Geodesia. Estos métodos utilizan la medida de fase para la determinación de la línea base entre el receptor fijo y el receptor móvil:

### 1. Método Estático Relativo Estándar

Se trata del clásico posicionamiento para la medida de distancias con gran precisión ( $5\text{mm} + 1\text{ppm}$ ) en el que dos o más receptores se estacionan y observan durante un periodo mínimo de media hora, una o dos (o más), según la redundancia y precisión necesarias, y en función de la configuración de la constelación local y distancia a observar. Los resultados obtenidos pueden alcanzar precisiones muy altas, teóricamente hasta niveles milimétricos. Este método es el empleado para medir distancias mayores de 20 kilómetros con toda precisión.

Las aplicaciones de este método son:

- Redes geodésicas de cobertura a grandes áreas.
- Redes nacionales y continentales.
- Seguimientos de movimientos tectónicos.
- Redes de gran precisión.

## 2. Método Estático Relativo Rápido

Es una variante del Método Estático Relativo Estándar. De esta forma se reducen los periodos de observación hasta 5 o 10 minutos por estación, manteniendo los mismos ordenes de precisión que para el método Estático (5mm-10mm + 1ppm). Utiliza un algoritmo para la resolución estadística de las ambigüedades (en los equipos de la casa Leica, este algoritmo de resolución rápida de ambigüedades se denomina FARA), que permite la disminución de los tiempos de observación, por el contrario, tiene la limitación en las distancias a observar, menores de 20 kilómetros. El método destaca por su rapidez, sencillez y eficacia.

Las aplicaciones de este método son:

- Redes topográficas locales.
- Redes de control.
- Apoyo fotogramétrico.

## 3. Método Cinemático Relativo

El receptor de referencia estará en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil (ROVER), deberá ser inicializado para resolver la ambigüedad, de una de las siguientes formas: mediante una observación en estático (rápido) o bien, partiendo de un punto con coordenadas conocidas. Las épocas o intervalos de cadencia de toma de datos será función del objetivo de trabajo (velocidad del movimiento, cantidad de puntos a levantar...). Existen mayores restricciones en la observación, ya que no puede haber pérdida de la ambigüedad calculada inicialmente. Si la hubiera tendríamos que volver a inicializar el receptor móvil.

Existe una variante de este método denominado STOP&GO. En este caso existe un número determinado de puntos a levantar, en los cuales realizaremos una parada durante unas épocas, almacenaremos la información del punto y seguiremos sin perder la señal de los satélites, hacia el siguiente punto a levantar. Este método ha quedado obsoleto en la actualidad debido a la aparición del RTK.

## 4. Real Time Kinematic (RTK)- GPS en Tiempo Real

Consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica (1 ó 2 cm + 1ppm). Usualmente se aplica este método a posicionamientos cinemáticos, aunque también permite posicionamientos estáticos. Es un método diferencial o relativo. El receptor fijo o referencia estará en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil o "rover", es el receptor en movimiento del cual se determinarán las coordenadas en tiempo real (teniendo la opción de hacerlo en el sistema de referencia local). Precisa de transmisión por algún sistema de telecomunicaciones (vía radio-modem, GSM, GPRS, por satélite u otros) entre REFERENCIA y ROVER. Esta sería una restricción en la utilización de este método (dependencia del alcance de la transmisión). Sus aplicaciones son muchas en el mundo de la topografía, y van desde levantamientos, hasta replanteos en tiempo real, fundamentalmente.

## 5. Real Time Diferencial GPS (RTDGPS)

Consiste en la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión métrica o submétrica. Es un método diferencial o relativo. El receptor fijo o referencia estará

en modo estático en un punto de coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil o Rover, es el receptor en movimiento del cual se determinarán las coordenadas en tiempo real (teniendo la opción de hacerlo en el sistema de referencia local). Se trabaja con el código, es decir con la medida de pseudodistancias. En el receptor móvil se realiza una corrección a las pseudodistancias calculadas, mediante los parámetros de corrección que envía el receptor de referencia. Precisa de transmisión por algún sistema de telecomunicaciones entre REFERENCIA y ROVER. Este sería una restricción en la utilización de este método (dependencia del alcance del sistema de transmisión de telecomunicaciones utilizado). Mejora el posicionamiento absoluto por código. Este método se aplica fundamentalmente en navegación. En el caso de topografía y cartografía se usa en levantamientos a pequeña escala, GIS, actualizaciones cartográficas de pequeña escala...

## 8. PROYECTO DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO

8.1 *GEOREFERENCIACIÓN: TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA*

8.2 *OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO*

8.3 *RESULTADOS*

El objetivo de un proyecto de apoyo fotogramétrico consiste en dotar de coordenadas X, Y, Z en ED-50 a una serie de puntos del terreno distribuidos por la zona del vuelo. Estos puntos servirán como puntos de apoyo para la realización de un plano topográfico mediante métodos fotogramétricos.

El desarrollo del trabajo se puede dividir en tres apartados: georeferenciación, obtención de los datos específicos, y presentación de resultados (coordenadas o cartografía).

Las dos primeras labores constan de una previa planificación de las observaciones en gabinete, de su aplicación en el campo, donde efectuaremos la captura de los datos, y por último de un tratamiento de esos datos en gabinete.

En las labores de gabinete previas se incluirán la preparación de los fotogramas, delimitando las zonas de solape y los entornos óptimos de ubicación de los puntos de apoyo, con un lápiz grueso, formando los modelos con las fotografías.

El tamaño del detalle que se seleccionará como punto de apoyo dependerá de la escala de la cartografía final y de la escala del vuelo fotogramétrico, no debiendo trabajar en los límites de la imagen por las deformaciones. Se debe mantener una distancia de 2 a 4 cm a los bordes del fotograma.

Los puntos de apoyo deberán cubrir homogéneamente la superficie del par fotogramétricos, así como las pasadas adyacentes.

A continuación pasamos a exponer los trabajos topográficos a realizar aplicando la metodología GPS.

### 8.1 GEOREFERENCIACION: TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA

La necesidad de trabajar en un único sistema de coordenadas común para un determinado ámbito requiere la existencia física y permanente de una serie de puntos con coordenadas conocidas en dicho sistema.

Sobre estos puntos nos apoyaremos para determinar las coordenadas de nuestras bases de trabajo (previamente colocadas para cubrir la zona de trabajo) referidas a ese sistema inicial. A esta fase del proyecto se la conoce como georeferenciación o enlace con la geodesia.

Esos puntos conocidos previamente son los vértices geodésicos. De ellos sabemos sus coordenadas referidas al Datum Europeo ED-50 (Sistema ED-50), compuesto por el Punto Fundamental (Potsdam), Elipsoide Internacional o de Hayford y además sus coordenadas proyectadas cartográficamente, generalmente en España en la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator).

## 1. Planificación.

En gabinete hay que planificar la elección de los vértices geodésicos que se van a utilizar, así como la ubicación de las bases que van a implantarse en la zona a apoyar.

En la selección de los vértices, se han de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los vértices geodésicos han de ser un mínimo de cuatro (3 vértices conllevan sólo dos grados de libertad), pues con ellos calcularemos unos parámetros de transformación y en caso de tener menos no podremos comprobar la resolución de dichos parámetros.
- Han de cubrir perfectamente la zona.
- Han de ser aproximadamente equidistantes entre ellos.

## 2. Campo

### 2.1 Localización de los vértices

El objetivo del trabajo de campo es la obtención de las coordenadas GPS de los vértices y de las bases planificadas en gabinete.

Tras solicitar las reseñas y las coordenadas ED-50 de los vértices al Instituto Geográfico Nacional, se comprueba su localización. Se obtienen las fotografías de los mismos y se elaboran sus reseñas para futuras localizaciones, si se considera necesario.

A continuación se efectúa el reconocimiento de la zona de trabajo, y se comprueban los emplazamientos de los nuevos vértices diseñados. Posteriormente se lleva a cabo la señalización de los mismos y la confección de las reseñas.

### 2.2 Estacionamientos y observaciones

Las técnicas de observación GPS requieren un mínimo de cuatro satélites y de un GDOP no superior a 8. También ha de decidirse la máscara de elevación, generalmente de 15° por encima del horizonte, durante las horas de trabajo.

Ya con las bases y los vértices perfectamente localizados y reseñados comenzamos la observación utilizando el método estático estándar o rápido dependiendo de la distancia a la que se encuentren los vértices geodésicos seleccionados, respecto a la zona a apoyar.

El método estático estándar se emplea para distancias largas que superen los 20 Km. Normalmente se trabaja en post-proceso pues las condiciones de observación son diferentes en cada estación GPS. Las soluciones obtenidas son tan redundantes como deseamos, basta con ampliar las observaciones en común que han de ser de un mínimo de 25 - 30 minutos que aumentarán según aumente la distancia.

La precisión de una línea base es de 5 mm. + 1 ppm. siempre que se trate de dos equipos bifrecuencia y que observen en fase.

Con distancias inferiores a los 20 Km podremos utilizar el método estático rápido. La diferencia con el método anterior son los algoritmos de cálculo, pues la forma de trabajar con los equipos es la misma. Es lógico que al reducir la distancia los tiempos de observación sean menores. La precisión que se obtiene con equipos bifrecuencia será del orden de 5 mm. + 1 ppm.



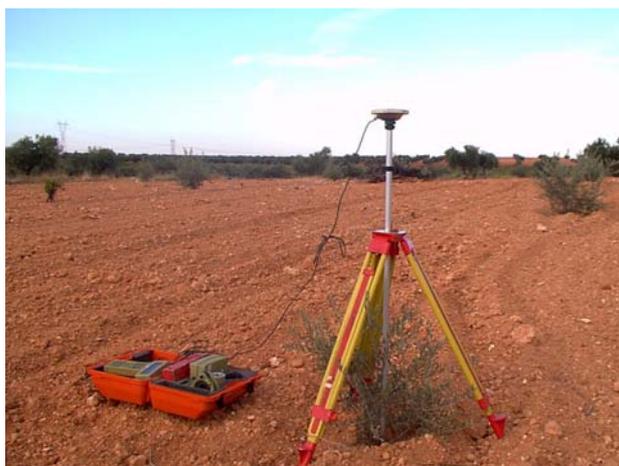
**Estación de Referencia**

Una vez observados los vértices geodésicos y las nuevas bases, se estaciona un receptor en una de ellas. Esta será la estación de referencia.

El método GPS de trabajo para el apoyo fotogramétrico es el método estático rápido. Un segundo receptor se desplaza al puntos de apoyo para obtener los datos de observación del mismo.

Una vez localizado el entorno de la imagen en el que se ha dar el punto de apoyo y seleccionado el detalle que va a serlo, se estaciona el equipo y se mide la altura de la antena. Se pone en funcionamiento el receptor, se introduce a través del controlador el nombre de la estación, la altura de la antena y se selecciona la máscara de elevación ( $10^\circ$  o  $15^\circ$ ) para que el equipo no tome datos de satélites situados por debajo de esa altura de horizonte A continuación se efectúa la toma de datos GPS.

La toma de datos será de unos 10 minutos dependiendo del número de satélites disponibles sobre el horizonte, así como de la distancia del receptor móvil al receptor fijo, y de las pérdidas de ciclo que se ocasionen. El GDOP nos proporcionará un indicador de la geometría de los satélites, cuanto más próximo sea a 1, mejor será la geometría disponible.



**Equipo móvil: ejemplo de punto de apoyo**

Mientras el receptor adquiere los datos de los satélites, se realiza el croquis del punto de apoyo observando la imagen del entorno en la fotografía con un cuentahílos (este es un detalle importante ya que el operador que restituya sólo conocerá del terreno aquello que vea a través de las fotografías y no la zona del terreno tal como la observamos en campo). Se ha de indicar sobre el croquis si la altura se ha tomado al suelo o a otra referencia para que no exista ambigüedad altimétrica en el posado del índice sobre el punto de apoyo. Por ejemplo se indicará en una tapia si la cota es a suelo o a la parte superior de la misma.

A continuación se pincha sobre la fotografía el punto de apoyo y se rotula su número en la imagen con un lápiz grueso.

Posteriormente nos desplazaremos al resto de los puntos de apoyo repitiendo el proceso. Con el método el método diferencial estático rápido se utilizan tiempos de observación de 10-12 minutos.

### 2.3 Datos obtenidos

Al finalizar el trabajo de campo, en el terminal del equipo GPS móvil quedan almacenados en ficheros digitales, con el nombre de fichero que se haya introducido para el trabajo, el identificador y las coordenadas WGS-84 de los vértices geodésicos (mínimos) y de las bases de nueva implantación.

Del mismo modo habrán quedado registrados los datos de las observaciones realizadas sobre los puntos de apoyo.

De cada punto de apoyo tendremos un croquis y sobre los fotogramas se habrán pinchado con un cuentahílos.

## 3. **Gabinete**

### 3.1 Determinación de los parámetros de transformación de coordenadas WGS-84 a coordenadas ED-50

Al descargar los datos de los receptores GPS obtenemos archivos binarios, que son tratados para obtener un fichero RINEX (fichero en formato ASCII) capaz de ser leído por cualquier software de cálculo GPS. En estos ficheros vienen datos de mensajes de navegación, el estado de los satélites, y los datos de código y fase registrados.

El trabajo en gabinete se centra en el cálculo de los parámetros de transformación que nos permitan transformar coordenadas entre el sistema WGS-84 y el sistema ED-50 con proyección UTM en el huso que corresponda. Con esos parámetros y un sistema de coordenadas local se podrán obtener las coordenadas UTM de las bases de nueva implantación y de todos los puntos de apoyo observados desde dichas bases.

Para la obtención de estos parámetros se necesita un conjunto de puntos con coordenadas en sendos sistemas y un software informático con algoritmos matemáticos que comparando las coordenadas en uno y otro sistema determine esos parámetros.

El cálculo comienza con el volcado de los datos desde las tarjetas del receptor al ordenador. Para ello debe crearse un *proyecto* (a modo de carpeta de almacenamiento) donde quedarán registrados los datos de campo. Se debe realizar una comprobación de los datos adquiridos, asegurándose de que se dispone de las observaciones en los vértices geodésicos y en las nuevas bases. Esta comprobación se puede realizar de forma gráfica o mediante listados.

Al cálculo deberán incorporarse los ficheros de coordenadas de los vértices, y deberá indicarse el sistema de referencia de cálculo. Por ejemplo con el programa Ski-Pro que corresponde a equipos GPS de la casa Leica, la opción sería *Datum-Map*: se selecciona como sistema GPS, el proyecto que contiene las coordenadas GPS obtenidas en campo, y como sistema local el conjunto de coordenadas ED-50 generado a partir del ASCII.

A continuación se procede a realizar el cálculo de la transformación capaz de pasar coordenadas del sistema inicial (WGS-84) al sistema final (local-UTM).

La transformación seleccionada puede ser una transformación Clásica 3D modelo Bursa-Wolf, Badekas-Molodensky u otra diferente. La transformación Badekas-Molodensky toma como origen un centroide situado entre el centro de la tierra y la zona de trabajo, mientras que el modelo Bursa-Wolf toma como origen de la transformación el centro de la Tierra. En los trabajos topográficos se opta por el modelo Badekas-Molodensky al tratarse de zonas pequeñas, adaptándose mejor a ellas la transformación. El modelo Bursa-Wolf queda para transformaciones de grandes superficies (países o continentes).

En la transformación, si se han observado cuatro vértices geodésicos, tendremos 12 ecuaciones (tres por vértice  $(X,Y,Z)$ ), para 7 incógnitas (3 traslaciones, 3 rotaciones y un factor de escala), quedándonos 5 grados de libertad con posibilidad de cálculo de residuos para cada una de las incógnitas (parámetros). Los valores de los residuos nos dan una idea de la precisión de los parámetros de transformación obtenidos.

Este proceso permite realizar la transformación de sistema de referencia, y define la topografía de enlace con un determinado sistema de referencia previamente elegido. En nuestro caso el sistema de referencia es el proporcionado por los vértices geodésicos.

El proceso de georeferenciación se simplifica notablemente utilizando la Red REGENTE. Los puntos de esta red están dotados de coordenadas en el sistema ETRS-89 y en el ED-50.

### 3.2 Transformación de coordenadas WGS-84 / ED-50

De la fase anterior se han obtenido los parámetros de transformación que permiten obtener coordenadas en el sistema local a partir de observaciones GPS.

En los ficheros GPS, se tendrán incluidas observaciones de todos y cada uno de los puntos adicionales (además de los vértices geodésicos) observados.

Para la obtención de las coordenadas de todos los puntos observados en el sistema local elegido (ED-50), se aplicarán los parámetros de transformación que ya hemos calculado en la fase anterior.

Las coordenadas resultantes estarán en el sistema al que correspondan los parámetros de transformación que se han calculado.

El resultado será un listado de coordenadas ED-50 de los puntos de apoyo de la zona de trabajo, que se incorporarán a los croquis, y se entregarán al cliente junto con los fotogramas apoyados.

## 9. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO EN RTK

- 9.1 *GEOREFERENCIACIÓN: TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA*
- 9.2 *OBTENCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS*
- 9.3 *EDICION CARTOGRAFICA*

El levantamiento topográfico puede realizarse mediante el sistema GPS utilizando el método cinemático en tiempo real RTK (*Real Time Kinematic*). Para este levantamiento se utilizan 2 receptores con equipo de radio-modem, un trípode rígido, un bastón y un flexómetro.

Un ejemplo de equipo completo estaría compuesto por:

- Receptor de doble frecuencia en modo RTK.
- Baterías (para la estación de referencia y el receptor móvil).
- Antena de doble frecuencia.
- Terminal para receptor GPS.
- Radio-modem.



**Equipo GPS Leica**

Las coordenadas se obtienen en tiempo real con precisión de 20mm + 1ppm.

### 9.1 GEOREFERENCIACIÓN: TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA

El proceso de transformación de sistema de referencia se realiza de la misma forma que en el caso anterior. Se seleccionan los vértices geodésicos y se diseña la red básica del trabajo. Se efectúa la observación GPS.

En una primera fase de cálculo se obtienen los parámetros de transformación del sistema de referencia GPS al sistema local en el que se han de proporcionar los resultados, apoyándonos en los vértices previamente conocidos en el mismo (en nuestro ejemplo estos vértices son los vértices geodésicos).

Posteriormente se aplican dichos parámetros al resto de vértices obteniendo sus coordenadas en el sistema local.

## 9.2 OBTENCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS

Para la obtención del levantamiento de detalle, la metodología de observación con GPS en tiempo real, es un método rápido, cómodo y capaz de dar la precisión requerida para el trabajo.

El método de trabajo con GPS en tiempo real se compone de un GPS fijo de referencia y un GPS en movimiento. El receptor fijo lo situamos sobre un punto de la red básica, de coordenadas conocidas calculadas en la fase anterior en el sistema de referencia local. Este vértice se denomina como *vértice de referencia*.



**Estación de referencia**

La metodología en tiempo real se basa en el cálculo de ambigüedades en el mismo instante de la toma de datos. Tras poner en funcionamiento el receptor de referencia se ha de esperar a que éste resuelva las ambigüedades antes de proceder a la obtención de datos de los puntos del levantamiento.

Si el número de satélites sobre el horizonte y su geometría es válida, el receptor de referencia fija ambigüedades en pocos minutos. Una vez realizada esta operación el cálculo de coordenadas de los demás puntos será instantáneo.

La comunicación entre el receptor de referencia y los receptores móviles, es posible gracias al sistema de telecomunicaciones utilizado para la transmisión, con un alcance de 5 Km entre ambos receptores. Para evitar problemas de comunicación entre receptores puede elevarse la antena del receptor de referencia lo máximo posible.

El procedimiento para efectuar el levantamiento de detalle con equipos GPS en tiempo real requiere el mismo equipo que para posicionamientos diferenciales, además de sistemas de transmisión de telecomunicaciones.

Se estaciona el equipo de referencia (fijo) con posicionamiento absoluto indicándole que calcule su posición durante un intervalo de tiempo adecuado (de 15 a 20 minutos) o se introducen sus coordenadas conocidas con anterioridad. El receptor enviará las correcciones (RTCM-RTIME-RTCA) al equipo móvil a través de un sistema de telecomunicación operativo entre ambos receptores.

Las coordenadas de los puntos, se obtienen en el sistema de referencia WGS84. La metodología RTK permite asociar una proyección y un sistema de referencia distinto, podemos obtener las coordenadas de los puntos directamente en la proyección UTM. También podrían obtenerse en cualquier otro sistema de referencia local con respecto al cual se haya realizado la georeferenciación (transformación de sistema de referencia).

Las precisiones obtenidas en las coordenadas del levantamiento dependerán de varios factores (precisión de las coordenadas de la red, precisión de los equipos utilizados, errores accidentales cometidos, etc. ). De esta forma, la precisión de los puntos del levantamiento puede llegar a ser del orden de 2-3 cm.

El levantamiento se lleva a cabo por dos operarios con dos receptores, uno de referencia y otro móvil. Uno de los operadores se encarga de la toma de puntos con el receptor móvil, mientras que el otro operario va realizando los croquis de la zona, así como anotando el número de punto y su correspondiente descripción, quedando así definido cualquier tipo de elemento a representar. El receptor fijo sólo necesita vigilancia y control de la batería.



**Receptor móvil**

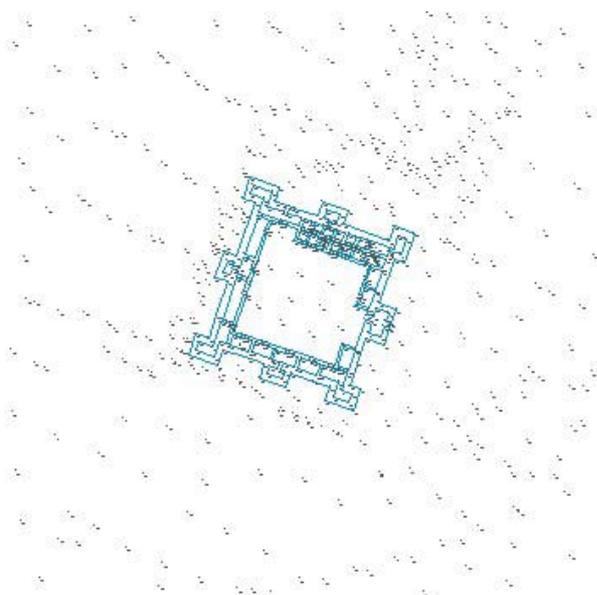
En los croquis se definen los elementos artificiales: registros de luz, aceras, carreteras,..; los elementos naturales: árboles, roquedos,... ; y los accidentes del terreno como por ejemplo los taludes, para obtener un buen resultado en la realización del curvado en gabinete.

El levantamiento de una carretera se efectuaría mediante perfiles transversales, tomando en cada uno de ellos los diferentes elementos que la componen (mediana, isletas de vial, arcenes, farolas, borde del asfalto y los puntos del talud en los que variaba la pendiente).

Para obtener las cotas del terreno necesarias para realizar posteriormente el curvado de la zona, se toman una serie de puntos de relleno, dando una mayor densidad de puntos en las zonas donde la topografía del terreno es más variable.

Al final de cada día los puntos observados en campo se importan al ordenador, observando la nube de puntos para asegurar el haber cubierto toda la zona a levantar y evitando que queden zonas sin el número de puntos adecuado para una buena edición posterior.

A continuación mostramos un ejemplo de los puntos levantados:



*Ejemplo de nube de puntos<sup>1</sup>*

### 9.3 EDICIÓN CARTOGRÁFICA

#### ○ **Adquisición de Datos**

La captura de datos es el primer paso en el proceso de producción cartográfica. Una vez listados todos los puntos tomados en campo, se exportan a formato ASCII, desde el programa de cálculo GPS. Con el fichero ASCII, se importan los datos al programa de cálculo topográfico, y desde él a formato DXF, para comenzar a trabajar desde el programa Microstation, en formato DGN, o dwg en Autocad. De esta manera se obtiene la nube de puntos en un fichero de diseño 3D, con el cual poder realizar las operaciones necesarias para la obtención del mapa.

#### ○ **Producción cartográfica**

---

<sup>1</sup> FUENTES FERNANDEZ, Ivan y GRANADO RODRIGUEZ, Daniel (2004): *Levantamiento a escala 1/500 de la zona arqueológica de Mleiha, ubicada en el Emirato de Sharjah con receptores GPS. Obtención de un modelo tridimensional del yacimiento arqueológico ML2*. Proyecto Fin de Carrera E.U.I.T. Topográfica. Madrid

En este proceso se prepara la simbología clasificando los símbolos según entidades (puntuales, lineales y superficiales) acordes con los croquis de la zona realizados en el campo.

Establecida la simbología que va a utilizarse, se efectúa el curvado para determinar el relieve. Las curvas pueden someterse a procesos de generalización, aplicándoles suavizados, correcciones y modificaciones para una mejor comprensión del relieve y obtener un buen aspecto visual.

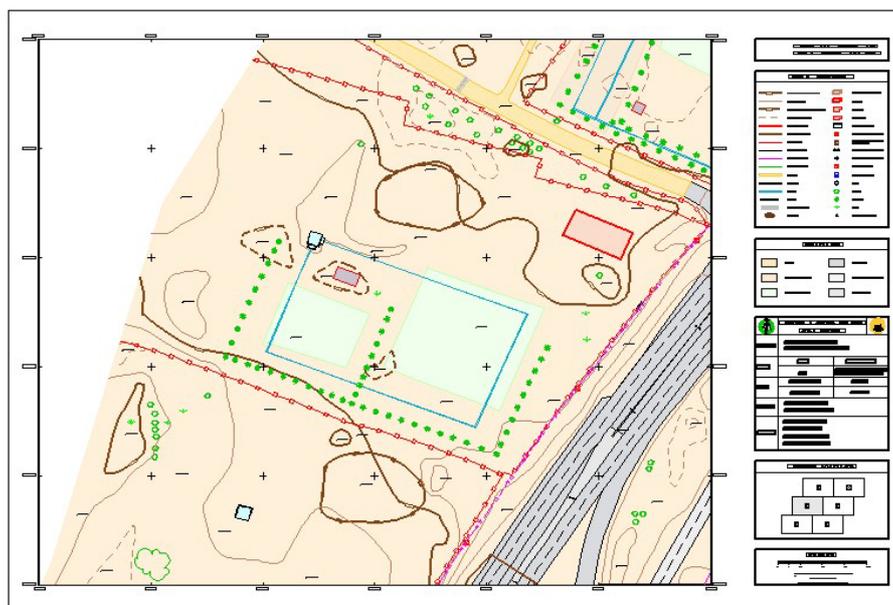
Se determina el perímetro de toda la zona y a continuación se realiza el proceso de edición del plano. Representada toda la zona de trabajo, se procede a la distribución de las hojas, obteniendo una mayor manejabilidad en el tratamiento de la información obtenida.

Dependiendo de las dimensiones de la hoja se define el diseño de la cuadrícula, el marco y la leyenda, teniendo siempre en cuenta la escala de trabajo y el formato de salida.

Una vez realizado todo el proceso de edición, se lleva a cabo la revisión de las hojas, en donde se corrigen los posibles errores cometidos, comprobando los siguientes aspectos:

- Diseño de la simbolización
- Elaboración de las curvas de nivel
- Selección de puntos acotados
- Distribución y diseño de las hojas
- Prioridad en la superposición de capas

Como resultado final de todos los procesos anteriores se obtiene la cartografía, pudiendo ser su formato tanto digital como en papel.



**Ejemplo de cartografía final<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> FUENTES FERNANDEZ, Ivan y GRANADO RODRIGUEZ, Daniel (2004): *Levantamiento a escala 1/500 de la zona arqueológica de Mleiha, ubicada en el Emirato de Sharjah con receptores GPS. Obtención de un modelo tridimensional del yacimiento arqueológico ML2*. Proyecto Fin de Carrera E.U.I.T. Topográfica. Madrid

- **Modelo digital y curvado del terreno**

En la actualidad los modelos digitales tienen interés propio, además de permitir la realización del curvado cartográfico. Es por ello por lo que nos detenemos en su estudio.

Definiremos el modelo digital del terreno como una "representación continua de la superficie de la Tierra, seleccionando un gran número de puntos de los cuales sus coordenadas XYZ son conocidas y representadas en un sistema arbitrario de coordenadas", o una "representación digital del terreno en forma adecuada para su procesamiento informático". Básicamente consiste en utilizar una metodología y un algoritmo matemático que permita:

- Calcular la cota en cualquier punto del terreno
- Generar curvas de nivel

Los datos de entrada disponibles son las coordenadas XYZ de cada uno de los puntos tomados en campo. La calidad de estos datos será fundamental para conseguir un buen modelo matemático del terreno, se habrán seleccionado en campo los puntos que mejor representen el terreno y se habrá realizado una distribución uniforme en la toma de los puntos, con una mayor densidad de éstos en las zonas donde se puedan producir mayores indeterminaciones.

A la hora de realizar la malla de triángulos del terreno, tendremos que definir los tipos de puntos tomados en campo para la creación del MDT, para obtener el mejor comportamiento posible en el modelo:

- **Puntos de relleno** - Puntos con coordenadas XYZ necesarios para la creación del modelo. Los triángulos que se forman en el modelo tienen sus vértices en estos puntos.
- **Líneas de ruptura** - Están definidas por una serie de puntos e indican un cambio brusco en las características del terreno. Éstas son cabeza y pie de talud, límite de asfalto, etc. Los lados de los triángulos se apoyan sobre estas líneas y nunca las atraviesan.

A partir de las entidades anteriormente definidas se genera el modelo digital del terreno MDT, guardándose la superficie representada en un fichero, en el cual se aprecia cómo los lados de los triángulos respetan las entidades definidas apoyándose en las líneas de ruptura del modelo, como hemos comentado anteriormente.

Con el modelo generado se efectúa un control visual de la forma del terreno, para tratar de localizar los posibles errores residuales que se pudieran generar, como brusquedad en las elevaciones y depresiones.

Una vez realizada la malla de triángulos, se genera el curvado obtenido por interpolación lineal en cada uno de los triángulos que conforman la malla. Utilizando este método se obtienen todos los puntos que forman las curvas que son consecuencia de la intersección de planos horizontales con las aristas de los triángulos.

La representación del relieve se puede efectuar mediante curvas de nivel con una cierta equidistancia, por ejemplo de 0.5 metros en una escala de representación

1:500, complementadas con una serie de puntos acotados. A las curvas obtenidas se les puede aplicar los siguientes procesos para obtener mejores resultados:

- **Suavizado de las curvas de nivel** – Es un proceso automático, de esta manera eliminamos picos y ángulos de las curvas de nivel muy visibles en la representación de la escala del proyecto. Así mejoramos tanto la visualización como la correspondencia de las curvas con el terreno, ayudando a una buena percepción por parte del usuario del plano.
- **Corrección manual de las curvas** – A pesar del suavizado automático de las curvas, en algunos tramos de ellas hay que realizar correcciones, como puede ser la inserción de más vértices en las curvas para generar un aspecto más lineal, o quitar posibles ángulos que dan un aspecto poco realista de las curvas. Todo esto se realiza respetando en todo lo posible el curvado inicial.
- **Rotulación manual de curvas de nivel maestras** – Se realiza una corrección de la posición de los rótulos de algunas curvas, debido que los textos colocados de forma automática no siempre respetan las normas cartográficas de toponimia.

El curvado se importa al fichero gráfico y se obtiene la cartografía (apartado anterior) o bien se crea un fichero digital para otros tratamientos.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- CATURLA, J.L. (1988): Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, I.G.N. Madrid.
- FUENTES FERNANDEZ, Ivan y GRANADO RODRIGUEZ, Daniel (2004): Levantamiento a escala 1/500 de la zona arqueológica de Mleiha, ubicada en el Emirato de Sharjah con receptores GPS. Obtención de un modelo tridimensional del yacimiento arqueológico ML2. Proyecto Fin de Carrera E.U.I.T. Topográfica. Madrid
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LIUCHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (1994): GPS Theory and Practice. Springer-Verlag, Wien, Austria.
- LEICK, A (1995): GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- NUÑEZ-GARCÍA, A.; VALBUENA, J.L.; VELASCO, J. (1992): GPS La Nueva Era de la Topografía. Ediciones de las Ciencias Sociales, S.A. Madrid.
- TEUNISSEN, P.J.; KLEUSBERG, A. (1998): GPS for Geodsey. Ed. Springer-Verlag, Germany.