

**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**FUNDAMENTOS GEODÉSICOS RELACIONADOS  
CON EL GEOPOSICIONAMIENTO SATELITAL**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:  
MOISÉS ESPITIA MARTÍNEZ**

**ASESOR DE TESIS:  
ING. JOSÉ RAFAEL PURECO HERNÁNDEZ**

**Morelia, Mich a Enero de 2009**

# **FUNDAMENTOS GEODESICOS RELACIONADOS CON EL GEOPOSICIONAMIENTO SATELITAL**

## **PROLOGO**

### **CAPITULO 1. NOCIONES GENERALES DE GEODESIA.**

- 1.1 DEFINICION.
- 1.2 GENERALIDADES.
- 1.3 RESEÑA HISTORICA.
- 1.4 LA GEODESIA EN MÉXICO.

### **CAPITULO 2. CONCEPTOS GEODESICOS FUNDAMENTALES.**

- 2.1 GEOIDE.
  - 2.1.1.- MÉTODOS PARA LA DETERMINACION DEL GEOIDE.
  - 2.1.2.- MODELO GEOIDAL MEXICANO ACTUAL.
  - 2.1.3.- MODELOS GEOIDALES GLOBALES.
  - 2.1.4.- APLICACIONES DE LA SOLUCION GEOIDAL.
- 2.2 ELIPSOIDE DE REVOLUCION.
- 2.3 DETERMINACIONES ALTIMETRICAS EN GEODESIA (ALTURA ELIPSOIDAL, COTA ORTOMETRICA, ONDULACION GEOIDAL Y ALTURA TOPOGRAFICA)
- 2.4 DÁTUM GEODESICO.
  - 2.4.1.-DÁTUM HORIZONTAL.
  - 2.4.2.-DÁTUM VERTICAL.

### **CAPITULO 3. SISTEMAS GEODESICOS DE REFERENCIA.**

- 3.1.- SISTEMAS GEODESICOS DE REFERENCIA
  - 3.1.1- SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS EN GEODESIA.
    - 3.1.1.1.- SISTEMAS DE COORDENADAS ASTRONÓMICAS Y GEODÉSICAS
    - 3.1.1.2.- SISTEMA DE COORDENADAS RECTANGULARES GEOCÉNTRICAS (X, Y, Z)
- 3.2.- SISTEMAS DE REFERENCIA
  - 3.2.1.- SISTEMAS CLASICOS DE REFERENCIA.
  - 3.2.2.- SISTEMAS GEOCENTRICOS
  - 3.2.3.- SISTEMAS LOCALES.
  - 3.2.4.- SISTEMAS DE REFERENCIA MUNDIALES.
- 3.3.- SISTEMA INTERNACIONAL TERRESTRE.
  - 3.3.1.- SISTEMA DE REFERENCIA CELESTE (ICRS)
  - 3.3.2.- SISTEMA DE REFERENCIA TERRESTRE (ITRS).
  - 3.3.3.- SISTEMAS MODERNOS.
    - 3.3.3.1.- SISTEMA ITRF.
    - 3.3.3.2.- SISTEMA WGS84
- 3.4.- MARCOS DE REFERENCIA.
- 3.5.- TRANSFORMACION ENTRE SISTEMAS.
- 3.6.- SISTEMA DE REFERENCIA GEODESICO MEXICANO.

### 3.7.- LA GEORREFERENCIACIÓN.

## **CAPITULO 4. PROYECCIONES.**

### 4.1.- GENERALIDADES.

### 4.2.- CLASIFICACION DE LAS PROYECCIONES.

### 4.3.- PROYECCION UTM.

### 4.4.- ASIGNACION DE CLAVES CARTOGRAFICAS A LAS CARTAS TOPOGRAFICAS

## **CAPITULO 5. GEODESIA ESPACIAL.**

### 5.1.- GENERALIDADES

### 5.2.- MÉTODOS DE LA GEODESIA ESPACIAL

#### 5.2.1.- MEDIDAS DE DIRECCION DE SATELITE

#### 5.2.2.- MEDIDAS DE DISTANCIA OBSERVATORIO – SATELITE

#### 5.2.3.- MEDIDAS DOPPLER

#### 5.2.4.- ALTIMETRÍA DE SATELITES

#### 5.2.5.- INTERFEROMETRÍA DE LARGA BASE (VLBI)

#### 5.2.6.- MEDICIONES LASER A SATELITES (SLR)

#### 5.2.7.- TELEMETRÍA LASER SOBRE LA LUNA (LLR).

## **CAPITULO 6. SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACION POR SATELITE (GNSS).**

### 6.1.- DEFINICION

### 6.2.- ANTECEDENTES

### 6.3.- TEORIA Y CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES

### 6.4.- APLICACIONES.

### 6.5.- SISTEMA DE POSICIONAMIENTO POR SATELITES ACTUALES.

#### 6.5.1.- NAVSTAR GPS

#### 6.5.2.- GLONASS

### 6.6.- SISTEMA DE POSICIONAMIENTO POR SATELITES EN PROYECTO.

#### 6.6.1.- SISTEMA EUROPEO GALILELO

#### 6.6.2.- SISTEMA CHINO BEIDOU

### 6.7.- VULNERABILIDADES DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATELITES

## **CAPITULO 7. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL**

### 7.1.- ANTECEDENTES HISTORICOS

#### 7.1.1.- SISTEMA DE SATELITE TRANSIT.

#### 7.1.2.- SISTEMA DE SATELITE DOPPLER.

#### 7.1.3.-SISTEMA NAVSTAR GPS.

#### 7.1.4.- EL GPS HOY EN DIA.

### 7.2.-DESCRIPCION DEL SISTEMA DE NAVEGACION MUNDIAL.

#### 7.2.1.- EL SEGMENTO ESPACIAL.

#### 7.2.2.- EL SEGMENTO DE CONTROL.

#### 7.2.3.- EL SEGMENTO DEL USUARIO.

### 7.3. SERVICIOS DE POSICIONAMIENTO DISPONIBLES DEL GPS.

#### 7.3.1.- SERVICIO DE POSICIONAMIENTO STANDART (SPS)

#### 7.3.2.- SERVICIO DE POSICIONAMIENTO PRECISO (SPP)

7.4.- METODOS DE POSICIONAMIENTO.

7.4.1.- NAVEGACION AUTONOMA Y DE POSICION ABSOLUTA.

7.4.1.1. CALCULO DE LA DISTANCIA AL SATELITE.

7.4.1.2. FUENTES DE ERROR.

7.4.2.- POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL (DGPS).

7.4.3.- GPS DIFERENCIAL DE FASE PORTADORAS

7.5.- TIPOS DE LEVANTAMIENTOS.

7.6.- APLICACIONES DEL SISTEMA GPS

**CAPITULO 8. REDES GEODESICAS.**

8.1.- INTRODUCCION.

8.2.- SISTEMA GEODESICO NACIONAL

8.2.1.- RED GEODESICA HORIZONTAL

8.2.2.- RED GEODESICA VERTICAL.

8.2.3.- RED GEODÉSICA GRAVIMÉTRICA

**CONCLUSIONES**

**BIBLIOGRAFIA**

## PROLOGO

Los grandes cambios tecnológicos producidos en las dos últimas décadas unidos a las transformaciones políticas y económicas producidas más recientemente en nuestro país, están impactando fuertemente, como no podría ser de otra manera, en el pequeño mundo dentro del cual desenvolvemos nuestra actividad profesional. Entre estos cambios podemos citar:

- Los avances espectaculares en el campo de la informática que han permitido el desarrollo de nuevos soportes para el almacenamiento de enormes volúmenes de datos, procesadores cada vez más veloces y programas de gran potencia gráfica. En nuestro campo de trabajo estos avances se han manifestado principalmente a través de los conocidos sistemas de información geográfica (SIG).
- Una nueva tecnología de posicionamiento que hizo su aparición en el horizonte de los topógrafos y los geodestas para alcanzar en poco tiempo un desarrollo singular que aún continúa en expansión. No hace falta decir que nos referimos al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), cuyas aplicaciones se multiplican día a día.
- La demanda creciente ejercida por una sociedad cada vez más tecnificada sobre los recursos naturales y el medio ambiente que hace que cada vez sea más importante contar con información territorial precisa y actualizada.

Desde que el GPS se convirtió en un instrumento, cada vez más popular, para la topografía y la navegación, los topógrafos y navegantes se ven en la necesidad de comprender los fundamentos de cómo las posiciones GPS están relacionadas con los sistemas cartográficos comunes. Una de las causas más comunes de errores en los levantamientos con GPS resulta de una comprensión incorrecta de estas relaciones.

La determinación de una posición con GPS consigue un objetivo fundamental de la geodesia: la determinación absoluta de una posición con precisión uniforme en todos los puntos sobre la superficie de la Tierra. Utilizando la geodesia clásica y técnicas topográficas, la determinación de la posición es siempre relativa a los puntos de partida del levantamiento, la precisión obtenida es dependiente de la distancia a este punto. Por lo tanto, el GPS ofrece ventajas sobre las técnicas convencionales.

La aparición de estas técnicas satelitales han venido a revolucionar no solo el campo de la ingeniería topográfica si no también la cartografía, la geofísica, el estudio del campo gravítico de la Tierra y así como el estudio de los efectos dinámicos de la Tierra, así como el movimiento de las placas tectónicas, entre otros.

En este trabajo de tesis tratamos de explicar los fundamentos básicos de la geodesia y su relación intrínseca que tiene con el Geoposicionamiento por Satélites. Debemos destacar como se ha convertido en nuestros tiempos modernos en una herramienta básica para los trabajos de topografía, ya sea desde la concepción de las más simples tareas topográficas hasta aquellos que necesitan tener una georreferenciación puntual.

## CAPITULO 1.- NOCIONES GENERALES DE GEODESIA.

### 1.1.- DEFINICIÓN DE LA GEODESIA.

El término GEODESIA del griego (tierra) y (divisiones ó “yo divido”) fue usado inicialmente por Aristóteles 384-322 a.c.) y puede significar tanto “divisiones (geográficas) de la tierra” como también el acto de “dividir la tierra”, por ejemplo, entre propietarios.

La geodesia es, al mismo tiempo, una rama de las geociencias y una ingeniería, que trata del levantamiento y de la representación de la forma y de la superficie de la tierra, global y parcial, con sus formas parciales y artificiales.

La geodesia estudia la forma, dimensiones y campo gravitatorio de la Tierra en territorios extensos. Como ya sabemos, esta es su principal diferencia con la topografía, la cual basa sus trabajos en superficies de extensión reducida en las cuales puede considerarse despreciable la esfericidad terrestre.

La gran evolución que han experimentado los distintos aparatos topográficos, que nos han llevado a conseguir precisiones antes sólo imaginables tras complejos trabajos, ha llegado a dificultar sobremanera el establecimiento de separación clara entre ambas ciencias. En esencia, la geodesia comienza sus trabajos allí donde termina la topografía. De todas formas, no debe acometerse el estudio de estas ciencias por separado, pues están íntimamente relacionadas, de tal manera que la topografía necesitará apoyarse en la geodesia para una gran cantidad de aplicaciones prácticas.

F. R. Helmert (1880) define la geodesia como; la ciencia de la medida y representación de la Tierra. Su definición, válida aún en la actualidad, implica, de una parte, llegar al conocimiento de la forma y dimensiones de la Tierra, de otra, a la determinación de coordenadas para cada punto de su superficie (incluida la superficie de los océanos), lo que resulta imprescindible para una correcta representación.

Según esto, la Geodesia es una ciencia que se ocupa de darnos a conocer la forma y dimensiones de nuestro planeta, del mismo modo que la Astronomía pretende describirnos el mundo exterior en su totalidad. Este carácter, aparentemente restringido de la Geodesia, no excluye su gran importancia en el desarrollo de otras ciencias como la Astronomía, la Geofísica, la Geografía, la Cartografía, la Navegación, el Arte Militar, las Comunicaciones, etc. De la definición anterior parece deducirse que los problemas de la Geodesia son esencialmente geométricos; pero no debemos olvidar que, para llegar a definir la forma de la Tierra, es preciso considerar a nuestro planeta en un contexto más amplio.

En forma práctica podemos definir a la Geodesia, como la ciencia que se aplica para determinar la forma de la Tierra, así como su tamaño y campo de gravedad asociado mediante el posicionamiento preciso de puntos sobre la superficie terrestre, expresados en valores de un sistema coordinado tridimensional. Donde cada punto se compone de tres elementos, latitud, longitud y altitud.

Con la evolución y el desarrollo de nuevas técnicas de medición, la Geodesia se constituye como una herramienta esencial para realizar estudios de geodinámica terrestre, estudios geológicos, generación de cartografía digital más precisa, entre otras aplicaciones.

Se debe considerar que los datos que aporta la Geodesia no son fijos, se conoce la dirección geográfica de un sitio de interés para un tiempo dado, más la Tierra se mueve y los fenómenos naturales pueden cambiar la geografía de un día para otro. Por lo tanto, esta ciencia contribuye al estudio de las variaciones de la superficie terrestre a través del tiempo, lo cual se cuantifica para evaluar los fenómenos dinámicos de nuestro hogar.

El uso del tiempo y la representación de datos mediante símbolos para referirlos, siempre ha tenido un interés especial. Vemos que, el uso de pequeñas fracciones de tiempo y direcciones geográficas precisas determinan el éxito en el aterrizaje de un avión con cero visibilidad, en la localización de personas extraviadas, para que un discapacitado visual cruce una calle sin ayuda, y más. Nos movemos en tiempo real dentro del espacio físico que ocupamos.

En el desarrollo de nuestro país, la Geodesia contribuye en gran medida a la planificación y toma de decisiones para superar y resolver diversos problemas que tienen que ver con el bienestar de la población. Los datos geodésicos permiten referir geográficamente todo lo que existe en nuestro territorio y que es de utilidad.

La actividad geodésica ha recorrido un largo camino desde la era de las cintas para medir y los aparatos conocidos como teodolitos. Gracias a los maravillosos avances de la tecnología, es posible contar con instrumentos y equipos electrónicos, ópticos, inerciales y de rayo láser; además del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y las computadoras que ayudan a resolver los problemas de posicionamiento geodésico.

## **1.2.- GENERALIDADES.**

La Geodesia suministra, con sus teorías y sus resultados de mediciones y cálculos, la referencia geométrica para las demás ciencias como también para la Geoinformática, los Sistemas de Información Geográficos (SIG), el catastro, la planificación, las ingenierías de construcción, la navegación aérea, marítima y terrestre, entre otros e, inclusive, para aplicaciones militares y programas espaciales.

La Geodesia Superior ó Geodesia Teórica, dividida entre la Geodesia Física y la Geodesia Matemática trata de determinar y representar la figura de la tierra en términos globales; la Geodesia Inferior, también llamada Geodesia práctica o Topografía, levanta y representa partes menores de la tierra donde la superficie puede ser considerada plana. Para este fin, podemos considerar algunas ciencias auxiliares como es el caso de la Cartografía, de la Fotogrametría, del cálculo de compensación y de la Teoría de Errores de Observación, cada una con diversas subáreas.

Además de las disciplinas de la Geodesia científica, existen una serie de disciplinas técnicas que tratan problemas de la organización, administración pública o aplicación de mediciones geodésicas, por ejemplo la Cartografía sistemática, el Catastro inmobiliario, el Saneamiento Rural, las mediciones de Ingeniería y el Geoprocesamiento.

## **GEODESIA TEÓRICA.**

La observación y descripción del campo de gravedad y su variación temporal, actualmente, es considerada el problema de mayor interés en la Geodesia Teórica. La dirección de la fuerza de la

gravidad en un punto, producido por la rotación de la Tierra y por la masa terrestre, como también de la masa del sol, de la luna y de los otros planetas, y el mismo como la dirección como la dirección de la vertical (o de la plomada) en algún punto.

La dirección del campo de gravedad y la dirección vertical no son idénticas. Las superficies perpendiculares a estas direcciones son superficies equipotenciales. Una de estas superficies equipotenciales es llamada Geoide (es aquella superficie que más se aproxima al nivel medio del mar). El problema de la determinación de la figura terrestre es resuelto para un determinado momento si es conocido el campo de gravedad dentro de un sistema espacial de coordenadas. Este campo de gravedad también sufre alteraciones causadas por la rotación de la tierra y también por los movimientos de los planetas (mareas). Conforme el ritmo de las mareas, también la costra terrestre, a causa de las mismas fuerzas, sufre de formaciones elásticas: las “mareas” terrestres. Para una determinación del geoide, libre de hipótesis, se necesita en primer lugar de mediciones gravimétricas además de mediciones astronómicas, triangulaciones, nivelaciones geométricas y trigonométricas y observaciones de satélites (Geodesia por satélites).

### **GEODESIA FÍSICA.**

La mayor parte de las mediciones geodésicas se aplica en la superficie terrestre, donde, para fines de determinaciones planimétricas, son marcados puntos de una red de triangulación. Con los métodos exactos de la Geodesia matemática se proyectan estos puntos en una superficie geométrica que matemáticamente debe ser bien definida. Para este fin se suele definir un Elipsoide de rotación o Elipsoide de referencia. Existe una serie de elipsoides que antes fueron definidos para las necesidades de apenas un país, después para los continentes, hoy y para el globo entero, en primer lugar definidos en proyectos geodésicos internacionales y la aplicación de los métodos de la Geodesia de satélites.

Además del sistema de referencia planimétrica (red de triangulación y el elipsoide de rotación), existe un segundo sistema de referencia: el sistema de superficies equipotenciales y líneas verticales para las mediciones altimétricas. Según la definición geodésica, la altura de un punto es la longitud de las líneas de las verticales (curva) entre un punto P y el geoide (altura geodésica). También se puede describir la altura del punto P como la diferencia de potencial entre el geoide y aquella superficie equipotencial que contiene el punto P. Esta altura es llamada Cota Geopotencial. Las cotas geopotenciales tienen la ventaja, comparándolas con alturas métricas u ortométricas, de poder ser determinadas con alta precisión sin conocimientos de la forma del geoide (nivelación). Por esta razón, en los proyectos de nivelación de grandes áreas, como continentes, se suelen usar cotas geopotenciales, como en el caso de la “Red única de Altimetría de Europa”. En el caso de tener una cantidad suficiente, tanto de puntos planimétricos, como también altimétricos, se puede determinar el geoide local de aquella área.

El área de la Geodesia que trata de la definición local o global de la figura terrestre generalmente es llamada Geodesia Física, para aquella área, o para sus subáreas. También se usan términos como Geodesia Dinámica, Geodesia por Satélite, Gravimetría, Geodesia astronómica, Geodesia clásica, Geodesia tridimensional.

### **GEODESIA MATEMÁTICA.**

En la Geodesia matemática se formulan los métodos y las técnicas para la construcción y el cálculo de las coordenadas de redes de puntos de referencia para el levantamiento de un país o de una región. Estas redes pueden ser referenciadas para nuevas redes de orden inferior y para mediciones

topográficas y registrales. Para los cálculos planimétricos modernos se usan tres diferentes sistemas de coordenadas, definidos como “proyecciones conformes” de la red geográfica de coordenadas: la proyección estereográfica (para áreas de pequeña extensión), la proyección Lambert para (países con grandes extensiones en la dirección oeste-este) y la proyección Mercator transversal o proyección transversal de Gauss (por ejemplo UTM), para áreas con mayores extensiones meridionales. Según la resolución de la IUGG (Roma, 1954) cada país puede definir su propio sistema de referencia altimétrica. Estos sistemas también son llamados “Sistemas altimétricos de uso”. Tales sistemas de uso son por ejemplo: las alturas ortométricas, que son la longitud de la línea vertical entre un punto P y el punto P', que es la intersección de aquella línea de las verticales con el geoide. Se determina tal altura como la cota geopotencial a través de la relación, donde es la media de las aceleraciones de gravedad acompañando la línea PP', un valor que no es conmensurable directamente, y para determinarlo se necesita de más informaciones sobre la variación de las masas en el interior de la tierra. Las alturas ortométricas son exactamente definidas, su valor numérico se determina apenas aproximadamente. Para esa aproximación se usa también la relación (fórmula) donde la constante es la media de las aceleraciones de gravedad.

La gran evolución que han experimentado los distintos aparatos topográficos, que nos han llevado a conseguir precisiones antes sólo imaginables tras complejos trabajos, ha llegado a dificultar sobremanera el establecimiento de separación clara entre ambas ciencias. En esencia, la Geodesia comienza sus trabajos allí donde termina la Topografía. De todas formas, no debe acometerse el estudio de estas ciencias por separado, pues están íntimamente relacionadas, de tal manera que la Topografía necesitará apoyarse en la Geodesia para una gran cantidad de aplicaciones prácticas.

### **ORGANIZACIONES CIENTÍFICAS.**

Aunque en el siglo XIX Europa apenas contaba con organizaciones científicas o técnicas de Geodesia, hoy ellas existen en casi todos los países del mundo. Muchos tienen organizaciones independientes para subdisciplinas como la Cartografía, la Fotogrametría, la topografía, la geodesia minera, el catastro inmobiliario, etc. A nivel global, en primer lugar, es la “Federación Internacional de Geometría” (FIG), que coordina proyectos continentales o globales y que organiza el intercambio de informaciones y opiniones. La FIG también es miembro de la IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) para coordinar proyectos comunes con la participación de las disciplinas vecinas, como la Geofísica.

Las subdisciplinas de la Geodesia también cuentan con organizaciones globales. En el caso de la Fotogrametría, la “International Society of Photogrammetry and Remote Sensing” (ISPRS); en el área de la Cartografía, la “International Cartographic Association” (ICA), que coordina proyectos internacionales de mapeamiento continental o global.

### **OBJETIVOS DE LA GEODESIA.**

A continuación se describen los principales objetivos de la Geodesia:

- 1.-Establecer y mantener las redes de control geodésico tridimensionales ya sea nacional como global de la tierra, tomando en cuenta la naturaleza cambiante de estas redes debido al movimiento de las placas tectónicas.
- 2.-Medición y representación de fenómenos geofísicos (movimiento de los polos, mareas terrestres y movimiento de la corteza).
- 3.-Determinación del campo gravitacional de La Tierra, incluyendo las variaciones temporales.

### **1.3.- RESEÑA HISTORICA.**

#### **ÉPOCA ANTIGUA Y EDAD MEDIA.**

La Geodesia que tiene el mismo origen de la geometría, fue desarrollada en las altas culturas del oriente medio, con el objetivo de levantar y dividir las propiedades en parcelas. Las fórmulas usadas para calcular áreas, generalmente empíricas, fueron usadas por los agrimensores romanos y se encuentran también en los libros de geómetría, por ejemplo de Heron de Alejandría, que inventó la dioptra, el primer instrumento geodésico de precisión, que también permitía la nivelación que aumentaba la serie de instrumentos de la Geodesia (groma, nomon, mira, trena). Perfeccionó aún el instrumento de ktesibios para medir grandes distancias. Alejandro Magno aún llevó “Bematistas” para levantar los territorios conquistados.

Después de descubrir la forma esférica de la tierra, Eratóstenes determinó por primera vez el diámetro del globo terráqueo. Hiparco, Heron y Ptolomeo determinaban la longitud geográfica observando eclipses lunares, en el mismo instante, en dos puntos cuya distancia ya era conocida por mediciones.

Estos métodos fueron transferidos para la Edad Media a través de los libros de los agrimensores romanos y por los árabes, que también usaban el astrolabio, el cuadrante y el “Bastón de Jacobo” para tareas geodésicas. Entre los instrumentos de la Geodesia, desde el siglo XIII, se encuentran también la brújula. En el siglo XVI, S. Munster y R. Gemma Frisius, desarrollaron los métodos de la intersección que permitía el levantamiento de grandes áreas. El nivel hidrostático de Heron, hace varios siglos olvidado, fue reinventado en el siglo XVII.

#### **ÉPOCA MODERNA.**

Una nueva era de la Geodesia comenzó en el año 1617, cuando el holandés W. Snellius inventó la triangulación para el levantamiento de áreas grandes como regiones o países.

La primera aplicación de la triangulación fue el levantamiento de Wurtemberg por W. Schickard. En esta época, la Geodesia fue redefinida como la “ciencia y tecnología de la medición y de la determinación de la figura terrestre”. J. Picard realizó la primera medición de arco en el sur de París, cuyos datos en 1672, o el hecho del péndulo de 1 segundo cuya longitud aumenta, aproximándose a la línea del ecuador.

La “Academie des Sciences” de Paris mandó realizar mediciones de arcos meridianos en dos diferentes altitudes del globo, una (1735-45 1751) por P. Bouguer y Ch. M. de la Condamine en el norte del Perú (hoy Ecuador), y otra 1736/37 en Finlandia, por P. L. Maupertius, A.C. Clairaut y A. Celsius. Estas mediciones tenían como único objetivo la confirmación de la tesis de Newton y Huygens, aplicando los últimos conocimientos de la Astronomía y los métodos más modernos de medición y rectificación de la época, como constantes astronómicas perfeccionadas (presesión, aberración de la luz, refracción atmosférica), nutación del eje terrestre, medición de la constante de gravitación con péndulos y la corrección del desvío de la vertical, 1738 observado por la primera vez por P. Bouguer en las mediciones en el Chimborazo (Ecuador). Juntamente con la re-medición del “arco de Paris” por Cassini de Thury y N.L. de La Caille, la rectificación de las observaciones confirmó el achatamiento del globo terráqueo, y con eso, el elipsoide de rotación como figura matemática y primera aproximación en la geometría de la tierra.

En 1743, Clairaut publicó los resultados en su obra clásica la Geodesia. En los años siguientes la base teórica de la Geodesia fue perfeccionada, en primer lugar por d’Alembert (“determinación del achatamiento de la tierra a través de la presesión y nutación”) y también por Laplace, que determinó el achatamiento únicamente a través de observaciones del movimiento de la luna, tomando en

cuenta la variación de la densidad de la tierra. El desarrollo del “cálculo de probabilidades” (Laplace, 1818) y del “Método de los mínimos cuadrados” (C.F. Gauss, 1809) perfeccionaron la rectificación de observaciones y mejoraron los resultados de las triangulaciones. El siglo XIX comenzó con el descubrimiento de Laplace, que la figura física de la tierra es diferente del elipsoide de rotación, comprobado por la observación de desvíos de la vertical como diferencias entre latitudes astronómicas y geodésicas. En 1873 J.B. Listings usó, por primera vez, el nombre de “Geoide” para la figura física de la tierra. El final del siglo fue marcado por los grandes trabajos de “mediciones de arco meridianos” de los geodestas junto con los astrónomos, para determinar los parámetros de aquel elipsoide que tiene la mejor aproximación con la tierra física. Los elipsoides más importantes eran los de Bessel (1841) y de Clarke (1886 1880).

### **LA GEODESIA EN EL SIGLO XX.**

La Geodesia moderna comienza con los trabajos de Helmert, que usó el método de superficies en lugar del método de “medición de arcos” y extendió el teorema de Clairaut para elipsoides de rotación introduciendo el “Esferoide normal”. En 1909 Hayford aplicó este método para el territorio entero de Estados Unidos.

En el siglo XX se formaron asociaciones para realizar proyectos de dimensión global como la Asociación Geodésica (1886-1917, central en Potsdam) o la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (1919). La Geodesia recibió nuevos empujes a través del vínculo con la computación, que facilitó el ajuste de redes continentales de triangulación, y de los satélites artificiales para la medición de redes globales de triangulación y para mejorar el conocimiento sobre el geoide.

H. Wolf describió la base teórica para un modelo libre de hipótesis de una Geodesia tridimensional que, en forma del WGS84, facilitó la definición de posiciones, midiendo las distancias espaciales entre varios puntos vía GPS, y vino el fin de la triangulación, y la fusión entre la Geodesia superior y Geodesia Inferior (la topografía).

En la discusión para las tareas para el porvenir próximo de la Geodesia se encuentra la determinación del geoide como superficie equipotencial arriba y abajo de la superficie física de la tierra ( $w=0$ ) y la Geodesia dinámica para determinar la variación de la figura terrestre con el tiempo para fines teóricos (datos de observación para la comprobación de la teoría de Wegener) y prácticos (determinación de terremotos, etc.).

### **LA GEODESIA EN MÉXICO.**

La historia de la Geodesia en México, se remonta propiamente a la era prehispánica. El calendario azteca (que en realidad fue creado mucho antes; posiblemente por los olmecas; perfeccionado por los mayas; adoptándolo Moctezuma Hilcamina), es un testimonio histórico del avance de dicha civilización en astronomía. Sus construcciones y su disposición geométrica en la ciudad de Teotihuacan, tienen una escala basada en las dimensiones de la tierra y orientación referida a los cuerpos de nuestro sistema solar.

Durante la conquista, las exploraciones llevadas por los españoles permitieron recavar una gran cantidad de datos geográficos. Estos datos hicieron posible la construcción de mapas que más tarde constituyeron la Cartografía de la Colonia.

Otro trabajo fundamental fue realizado por Don Carlos Sigüenza Y Góngora y Don José Antonio Alzate y Ramírez, los cuales dieron origen al nuevo mapa geográfico de Norte América, escala 1: 2000,000.

El atlas geográfico y el ensayo político sobre el reino de la nueva España, publicados en París en 1811, por Alexander Von Humboldt mencionan los estudios geodésicos realizados en 1773, por Joaquín Velásquez Cárdenas de León, los cuales fueron usados como marco de referencia para la construcción de un sistema de drenaje en el Valle de México. Después del periodo de la Independencia, fueron concluidos muchos trabajos aislados con objetivos específicos. Lo de mayor valor fue la compilación de información de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, hecha por el geógrafo Antonio García Cubas. Este trabajo dio por resultado la publicación del atlas Histórico y Geográfico de la República Mexicana en 1856, por el ministerio de Economía y Obras Públicas.

Por la naturaleza de los trabajos emprendidos para la formación de la Carta Hidrográfica del Valle de México, en los años 1858 a 1861, puede decirse que a esa época corresponden los primeros trabajos que podrían llamarse geodésicos de la República Mexicana.

Dichos trabajos se efectuaron bajo la dirección del Ingeniero Geógrafo Don Francisco Díaz Covarrubias midiendo los ángulos con círculo repetidor y las bases con reglas de madera.

Aunque se hicieron igualmente trabajos astronómicos en algunos pueblos de la Cuenca del Valle, por la falta de buenos instrumentos y buenos catálogos de estrellas, no pueden considerarse dichas observaciones como de astronomía geodésica, si no como buenas observaciones geográficas, que permitieron colocar los puntos correspondientes de los trabajos ejecutados en su posición real en la esfera terrestre.

Los verdaderos trabajos geodésicos en los que se operó con la precisión requerida, empezaron en México en el año de 1898, (algunos autores dan el año de 1899), ejecutados por la Comisión de Geodésica Mexicana, creada en ese año, quedando bajo su responsabilidad el control vertical, horizontal y gravimétrico del país. El primer director de esta Comisión fue el ingeniero Geógrafo Don Ángel Anguiano.

Por el año de 1898 se lanzó una iniciativa del señor H.S. Pritchett, superintendente de la Coast and Geodetic Survey, de la que el ingeniero Díaz Covarrubias fue el primer Delegado por México, en la Asociación Geodésica Internacional, dicha iniciativa consistía en medir en América un gran arco de meridiano de 98° W.G. que atraviesa el Canadá, los Estados Unidos del Norte y la República Mexicana, desde el paralelo 15 hasta el mar glacial del Norte, procurando llevar la medida cuando menos hasta el paralelo de 60° pero debiendo extenderse lo más al norte que fuera posible.

Al aceptar México la invitación para medir la porción del meridiano de 98° W.G., comprendido en su territorio, se propuso no solo ejecutar los trabajos necesarios para dicha medida, si no establecer en el país las redes geodésicas de distintos ordenes que sirvieran de apoyo a los levantamientos topográficos de subsecuentes a fin de formar la carta oro-hidrográfica de la República con toda la precisión posible, exigida por el avance científico de la época.

### **COMISIÓN GEODÉSICA MEXICANA.**

Al desarrollarse el interés por los trabajos geodésicos se organizó en Europa en 1864 la Asociación de la Europa Media, que al ampliar su radio de acción adoptó en 1866 el nombre de Asociación Geodésica Internacional, a la que se afilió México, y que guardó una actitud pasiva hasta 1898, cuando aceptó colaborar con el Canadá y los Estados Unidos en la medición del arco del meridiano de 98° W de Greenwich, el cual atraviesa esos países.

Para ejecutar esos trabajos se integró la Comisión Geodésica Mexicana, bajo la dirección del ingeniero Ángel Anguiano, quien consideró que la nueva institución no debería conformarse con ejecutar la triangulación del meridiano de 98° W sino emprender otros trabajos que formasen una malla de apoyo indeformable y precisa para cubrir todo el territorio nacional. El arco de meridiano 98° W dentro del país tiene una longitud de 1 100 kilómetros, y la triangulación que se construyó cubre un área de 80 000 km<sup>2</sup> en parte de los estados de Guerrero, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala, San Luis Potosí, Veracruz y Tamaulipas, siguiendo la Sierra Madre Oriental y cruzando el estado de Oaxaca. La cadena está formada por 76 vértices que van del nivel del mar hasta cimas de 2 500 m de altura; las longitudes de los lados están comprendidas entre 10 y 130 Km. Las bases utilizadas fueron las de Oaxaca, Tecamachalco, Apam, Río Verde y La Cruz.

Los trabajos se iniciaron en 1901 y se concluyeron en 1915; se hizo la liga con la triangulación estadounidense en mayo de 1916 y se obtuvo un cierre de 1: 25 000 que hizo que el director de la Coast and Geodetic Survey declarara en Hamburgo, en el seno de la Asociación Geodésica Internacional, que la participación de México había sido “de la misma calidad que la de los americanos” (estadounidenses). Además, se ejecutó la triangulación del paralelo de México que parte de una base en la cuenca de México y termina en la torre sur de la catedral de la ciudad de Puebla y en el cerro de San Juan, a las afueras de la misma ciudad, habiéndose ligado a la triangulación del meridiano 98°. Se hizo también la triangulación del estado de Hidalgo, ligándola a la del paralelo 98° que en parte cruza el estado de México.

### **HISTORIA MODERNA.**

En 1968 se creó la Comisión de Estudios del Territorio Nacional y Planeación (CETENAP), que en 1970 pasó a ser la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) y en 1976 cambió a Dirección de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL); posteriormente, en 1981 se llamó Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DGGTN); en 1982, Dirección General del Territorio Nacional (DGETENAL) y desde 1983 pasó a ser la Dirección General de Geografía (DGG).

Hacia 1969 se iniciaron los levantamientos de posicionamiento vertical, formando líneas de nivelación geodésica de primero y segundo orden, referidas al nivel medio del mar, las cuales fueron ajustadas mediante las observaciones en estaciones mareográficas, ubicadas en los principales puertos del país, y utilizando las elevaciones de algunos bancos de nivel (BN) de la frontera norte, pertenecientes a la red de los Estados Unidos de América.

También, en ese mismo año, se iniciaron los levantamientos de posicionamiento (geodésicos) horizontal, por medio de poligonales de primero y segundo orden ligadas a los arcos de triangulación y trilateración para construir el canchale (red) de puntos. Además, se establecieron estaciones *doppler*, donde cada punto se encuentra referido al *dátum* norteamericano de 1927. Otro hecho importante tuvo lugar en 1970 con el inicio de los levantamientos gravimétricos regionales que se ligaron a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad de 1971 (IGSN71, por sus siglas en inglés). En 1974 inició el inventario físico y numérico de las marcas geodésicas establecidas en el territorio nacional; esto permitió saber con cuántas se contaba y cómo se encontraban, por lo que fue necesario realizar trabajos de recuperación de las que estaban destruidas, las cuales, primero, se reportaban y se planeaba volver a establecerlas en levantamientos geodésicos posteriores. Con la adquisición de equipo de cómputo para el Área de Geodesia de la DGG en 1981, se realizaron actividades con el fin de almacenar y manejar en un banco de datos;

fue el primer intento de manejar grandes volúmenes de información geodésica en formato digital, que hizo más fácil y rápido su manejo, control y mantenimiento; se puede decir que éste fue el origen para la creación de la actual Base de Datos Geodésicos (BDG). En 1990, el INEGI inició levantamientos con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), adoptando el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF92, por sus siglas en inglés) –del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS, por sus siglas en inglés), época 1988, asociado al elipsoide Sistema de Referencia Geodésico 1980 (GRS80, por sus siglas en inglés). Otro hecho sobresaliente se realizó el 19 de febrero de 1993, cuando el INEGI puso en operación la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), que actualmente se compone por 15 estaciones GPS de rastreo permanente llamadas estaciones fijas.

## **CAPITULO 2.- CONCEPTOS GEODESICOS FUNDAMENTALES.**

### **2.1.-EL GEOIDE.**

#### **INTRODUCCION A LA TEORIA DEL GEOIDE.**

En efecto, dentro del marco de la Mecánica clásica, con arreglo a un modelo simplificado, la Tierra es un planeta inmerso en el sistema solar, que se encuentra sometido a su rotación diurna, sensiblemente uniforme, y a las atracciones del Sol y de los demás cuerpos del sistema solar, con arreglo a la ley de Newton.

En estas condiciones, la Tierra describe una órbita que compensa, en cierto modo, tales atracciones, de manera que un punto sobre su superficie queda sometido casi exclusivamente a la atracción de nuestro planeta y a la fuerza centrífuga derivada de su rotación. Si representamos por  $V$  el potencial gravitatorio y por  $C$  el potencial centrífugo, la suma de ambos, esto es  $W=V+C$ , constituye el potencial  $W$  de la gravedad, que es, evidentemente, una función de las coordenadas de cada punto. El conjunto de puntos para los cuales  $W$  es constante define una superficie equipotencial  $W = \text{cte.}$ , cuyo gradiente determina en cada punto el vector gravedad  $g$ , por medio de la relación:  $g = -\text{grad } W$  siendo su dirección la que define la vertical del lugar.

Así pues, idealizando el problema y prescindiendo, por, tanto del movimiento orbital terrestre, vemos que tiene sentido estudiar las figuras de equilibrio que adoptará una masa aislada y fluida, cuyas partículas se atraen según la ley de Newton, por entender que ello responde a un posible estado de evolución en la formación de los planetas.

Se ha demostrado, por ejemplo, que la esfera es una figura de equilibrio para una masa homogénea, cuando está aislada y en reposo, y que el único movimiento posible para una masa homogénea que se mueve como un sólido, es una rotación uniforme alrededor de uno de sus ejes principales de inercia.

Ambas conclusiones, unidas al hecho de que una pequeña rotación produce un achatamiento sobre la forma esférica, nos lleva a considerar que la Tierra es aproximadamente un elipsoide achatado de revolución que gira con movimiento uniforme alrededor de su eje menor o polar.

En todo caso, conviene recordar que nos referimos a un cierto modelo teórico muy simplificado, puesto que la Tierra no es un cuerpo rígido homogéneo, sino un planeta compuesto por una parte más o menos sólida, una parte líquida u oceánica, que cubre aproximadamente el 70% de su superficie, y una atmósfera que la rodea en su totalidad.

Tanto su irregular superficie topográfica, como sus mareas o su atmósfera, están sujetos a deformaciones que llamamos mareas, sean éstas terrestres, oceánicas o atmosféricas. Sin embargo, la adopción de un determinado elipsoide, como modelo geométrico de propiedades bien conocidas, resulta útil para la fijación de un sistema de ejes a los cuales se refieren habitualmente las posiciones de los distintos puntos de su superficie por medio de dos coordenadas ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ), que reciben los nombres respectivos de longitud y latitud geodésicas.

Desde otro punto de vista, la superficie equipotencial o de nivel, que determinan los océanos cuando se prescinde del efecto perturbador de las mareas o, en otras palabras, la superficie del nivel medio de los mares, se denomina *Geoide* y es precisamente esta superficie la que sirve de referencia a la definición de una tercera coordenada, llamada altitud.

Sin duda, la introducción del *Geoide* como superficie de nivel, cuyo campo de gravedad verifica la condición:

$$W = W_0 = \text{cte.}$$

Tiene un gran sentido físico, puesto que se trata de una superficie continua y cerrada, que se extiende parcialmente por el interior de los continentes, aunque su determinación resulte ser uno de los más intrincados problemas de la geodesia.

Nos encontramos así con dos superficies fundamentales de referencia, el elipsoide y el geoide, que provienen de concepciones distintas y determinan hasta cierto punto la división clásica de la Geodesia en sus ramas de Geodesia Geométrica o Elipsoidal y Geodesia Física o Dinámica.

En rigor, ni siquiera haría falta la adopción del elipsoide y del geoide como referencias geodésicas; bastaría, en efecto, poder determinar las coordenadas  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ , de cada punto de la superficie terrestre con respecto a un prefijado sistema de ejes, rígidamente unido a la parte sólida de la Tierra. Pero las dificultades que esto presenta se adivinan casi insalvables. De ahí que sea necesario recurrir a continuados procesos de aproximaciones sucesivas, que permitan coordinar la creciente precisión de las medidas con la exactitud de los resultados.

Y a este proceso no es ajena la Astronomía, puesto que sus precisas determinaciones de posición, unidas al conocimiento de los movimientos de precesión, y nutación polar, colaboran eficazmente al desarrollo de la Geodesia, en tanto que esta Ciencia sirve de soporte a múltiples cuestiones astronómicas.

El enlace de ambas ciencias se produce a través de una clásica rama de la Geodesia, que recibe el nombre de Astronomía Geodésica.

### **DEFINICION DE GEOIDE.**

La palabra *Geoide* significa “forma de la tierra” y fue introducida por Listing en el año de 1873. El geoide es un esferoide tridimensional que constituye una superficie equipotencial imaginaria que resulta de suponer la superficie de los océanos en reposo y prolongada por debajo de los continentes

y que sería la superficie de equilibrio de las masas oceánicas sometidas a la acción gravitatoria y a la de la fuerza centrífuga ocasionada por la rotación y traslación del planeta de manera que la dirección de la gravedad es perpendicular a todos los lugares.

El geoide tiene en cuenta las anomalías gravimétricas (debidas a la distribución de las masas continentales y la densidad de los componentes de la Tierra) y el achatamiento de los polos, por el cual es una superficie irregular con protuberancias y depresiones.

Por tanto y resumiendo, podemos concluir que el geoide será el lugar geométrico de los puntos que se encuentran en equilibrio bajo la acción de las siguientes solicitaciones:

- Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los puntos de la superficie del mismo.
- Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los astros del sistema solar.
- Fuerza centrífuga, debida al movimiento de rotación de la Tierra.

Mediante el estudio de estas solicitaciones o fuerzas y los potenciales que las mismas producen es posible llegar a la definición geométrica del geoide.

Para la correcta definición del geoide es necesario establecer el concepto de nivel medio del mar, en contraposición con el podríamos llamar nivel instantáneo, pues la superficie real de los mares no se adapta con exactitud al geoide, debido a la existencia de mareas y corrientes.

Por lo tanto, podríamos definir al geoide como la superficie equipotencial que se corresponde con el nivel medio de los océanos. Como ya apuntábamos al principio de este capítulo, la desigual distribución de las masas continentales, así como la densidad variable de los materiales que componen nuestro Planeta, hacen que el geoide no sea una superficie regular y que, en cambio, presente protuberancias y depresiones, apartándose de la superficie regular media en desniveles que alcanzan hasta los  $\pm 100$  metros.

A continuación se muestra el siguiente modelo tridimensional del geoide, en el que se han amplificado sus ondulaciones para una mejor comprensión.



### 2.1.1. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL GEOIDE.

La Geodesia, como teoría de la forma y dimensiones de la Tierra, puede parecer una ciencia puramente geométrica. No obstante, en la actualidad, el campo gravítico de la Tierra, que es una cantidad física, está inextricablemente involucrado en la mayoría de las medidas geodésicas, incluso en las puramente geométricas.

### MÉTODOS ASTROGEODÉSICOS, GRAVIMÉTRICOS Y POR SATÉLITES.

Las medidas de la astronomía geodésica, de triangulación y de nivelación hacen todas uso esencial de la línea de la plomada, que al ser la dirección del vector gravedad no está menos físicamente definida que su magnitud, esto es, que la gravedad  $g$ .

Así pues, los métodos astrogeodésicos, que utilizan determinaciones astronómicas de latitud, longitud y acimut, y las operaciones geodésicas de triangulación, medida de bases y trilateración, pueden considerarse propiamente pertenecientes a la Geodesia física, tanto como los métodos gravimétricos.

Como diferencia general, los métodos astrogeodésicos utilizan la dirección del vector gravedad, empleando técnicas geométricas mientras que los métodos gravimétricos operan con el módulo del vector gravedad, haciendo uso de la teoría del potencial. Una clara demarcación es imposible y hay frecuentes solapamientos.

Los métodos gravimétricos se consideran ordinariamente como constituyentes de la Geodesia física, en sentido restringido. Para fijar la posición de un punto en el espacio necesitamos tres coordenadas. Podemos usar un sistema de coordenadas cartesianas rectangulares. No obstante, en muchos casos es preferible tomar las coordenadas naturales:  $F$  (latitud geográfica),  $L$  (longitud geográfica) y  $H$  (altitud sobre el geoide), que se refieren directamente al campo gravítico de la Tierra.

La altitud  $H$  se obtiene por nivelación geométrica, combinada con medidas de la gravedad, mientras que  $F$  y  $D$  se determinan por medidas astronómicas.

En tanto que el geoide pueda identificarse con un elipsoide, el uso de estas coordenadas para cálculos es muy sencillo. Puesto que esta identificación es suficiente sólo para resultados de muy baja precisión, la desviación del geoide respecto de un elipsoide debe tenerse en cuenta.

El geoide tiene, desgraciadamente, propiedades matemáticas muy desagradables: es una superficie complicada con discontinuidades en la curvatura. Así pues, no es conveniente como superficie sobre la que realizar cálculos matemáticos directamente, como lo es el elipsoide. Puesto que las desviaciones del geoide con respecto al elipsoide son pequeñas y pueden ser calculadas, es conveniente añadir pequeñas reducciones a las coordenadas originales  $D$ ,  $F$ ,  $H$ , de modo que se obtengan valores que se refieran a un elipsoide.

De esta forma, se tiene:

$$\varphi = F - x$$

$$\lambda = L - h \sec f$$

$$h = H + N$$

Donde:

$\varphi$  y  $\lambda$ , son las coordenadas geográficas sobre el elipsoide, llamadas también latitud geodésica y longitud geodésica para distinguirlas de la latitud astronómica  $F$  y la Longitud astronómica  $D$ .

Las coordenadas astronómicas y geodésicas difieren en la desviación de la vertical. La cantidad  $h$  es la altitud geométrica sobre el elipsoide; difiere de la altitud ortométrica  $H$  sobre el geoide en la ondulación del geoide  $N$ .

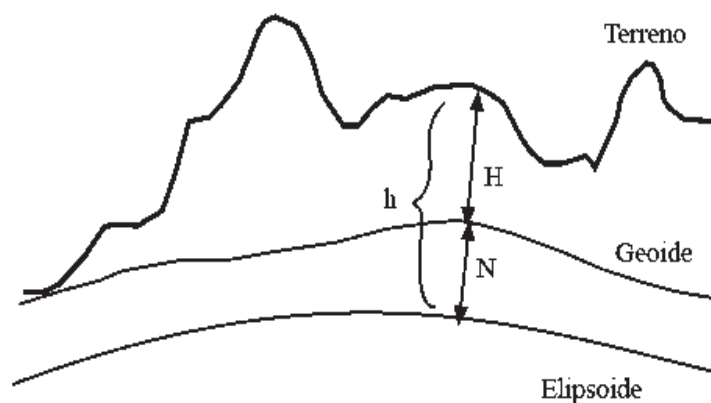
Estos sistemas de alturas se relacionan por medio de la ecuación  $h = H + N$

Donde:

$h$  = altura elipsoidal (altura del elipsoide a la superficie topográfica)

$N$  = altura geoidal u Ondulación geoidal (altura entre el elipsoide y geoide)

$H$  = altura Ortométrica. (Altura entre el geoide y la superficie topográfica)



Las medidas geodésicas (ángulos, distancias) se tratan de forma análoga. El principio de triangulación es bien conocido: las distancias se obtienen indirectamente midiendo los ángulos de una red apropiada de triángulos; sólo una base es necesaria para proporcionar la escala de la red. La triangulación fue indispensable en los primeros tiempos, porque los ángulos podían medirse mucho más fácilmente que las grandes distancias. No obstante, hoy día las grandes distancias pueden medirse de forma tan fácil como los ángulos utilizando instrumentos electrónicos, de modo que la triangulación, usando medidas angulares, es a menudo sustituida o suplementada por la trilateración que usa medidas de distancias.

El cálculo de triangulaciones y trilateraciones sobre el elipsoide es fácil. Por lo tanto, es conveniente reducir los ángulos medidos, las bases y las grandes distancias al elipsoide, de la misma manera que se tratan las coordenadas astronómicas. Entonces, las coordenadas geodésicas (elipsóidicas)  $\varphi, \lambda$  obtenidas (1) reduciendo las coordenadas astronómicas y (2) calculando triangulaciones o trilateraciones sobre el elipsoide pueden compararse entre sí; deberían ser idénticas para el mismo punto. Tomando un elipsoide de referencia, el geoide queda determinado cuando se conoce en cada punto de la superficie del elipsoide de referencia la altura del geoide o superficie equipotencial del campo de la gravedad coincidente con los mares en calma.

Tradicionalmente, existen los métodos gravimétricos y los métodos astrogeodésicos. Existe actualmente una tercera vía de determinación del geoide basada en observaciones a satélites.

Los métodos astrogeodésicos se basan en la ecuación de Helmert:

$$N = N_a - \int_a^b \epsilon \, ds$$

Siendo  $N$  la ondulación del geoide o altura de éste sobre el elipsoide.  $N_a$  es la ondulación en el punto  $a$ . El valor  $\epsilon$  es la desviación de la vertical en un punto de la superficie. Es el ángulo formado por la normal al elipsoide y la normal al geoide.

El valor de esta desviación de la vertical depende de l elipsoide adoptado como sistema de referencia, valiendo cero en el punto dátum, elegido como punto de coincidencia de geoide con elipsoide.

Se calcula a partir de las dos componentes  $x$ ,  $h$  de la desviación. Estas dos componentes se calculan a partir de la latitud y longitud astronómicas (sobre el Geoide por obtenerse con teodolitos astronómicos nivelados según la línea de la plomada), y de la latitud y longitud geodésicas (obtenidas por cálculos sobre el elipsoide).

El diferencial  $ds$  es un arco de cuerda elemental. Los métodos gravimétricos se basan en la ecuación de Stokes:

$$N = R / 4\pi G \cdot \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) \, d\sigma$$

En esta fórmula,  $R$  es un radio medio de la Tierra,  $G$  es un valor promedio de la gravedad. El valor  $\Delta g$  es la anomalía de la gravedad, o diferencia entre la gravedad real y la gravedad normal deducida para el potencial del elipsoide de revolución.  $S(\psi)$  es la función de Stokes.  $\psi$  es función de la posición del punto donde se quiere determinar  $N$ . La integral de superficie está extendida a toda la tierra, de ahí que sea de difícil aplicación, pues hay zonas de la tierra en las que no se tienen medidas de la gravedad.

En la práctica, es mejor calcular diferencias de  $N$ . Para ello, en lugar de  $\Delta g S(\psi)$  se tiene  $(\Delta g_o - \Delta g_m) S(\psi)$ , siendo  $(\Delta g_o - \Delta g_m)$  la diferencia entre la anomalía observada y la anomalía obtenida con un modelo matemático basado en armónicos esféricos.

Puede demostrarse que esa diferencia tiende a cero al aumentar la distancia, por lo que ya no es necesario obtener valores de anomalía en toda la tierra sino sólo en el entorno del la estación a determinar.

### COMPARACIÓN DE MÉTODOS.

Por una parte, las dos fórmulas son similares pues son integrales que contienen las diferencias de gravedad, diferencias en módulo en el caso de Stokes y diferencias en dirección, fórmula de Helmert, y ambas en forma lineal.

Por otra parte, las dos fórmulas muestran marcadas diferencias, en la fórmula de Helmert la integración se limita a un perfil, y se le necesita conocer la desviación de la vertical en un área determinada. Sin embargo, la posición del elipsoide de referencia con respecto al centro de gravedad de la tierra es desconocida y sólo puede determinarse por el método gravimétrico o por el Análisis de órbitas de satélites. Y más aún, el método astrogeodésico sólo puede usarse en los continentes, porque las medidas necesarias son imposibles en el Mar.

El método de Stokes exige mediciones de gravedad en el mar, las cuales sí son posibles. Este método puede dar, para toda la Tierra, ondulaciones absolutas del Geoide, con el centro del elipsoide de referencia coincidente con el centro de La Tierra.

Así pues, de los métodos clásicos, sólo el método gravimétrico hace posible un Sistema geodésico mundial. El método astrogeodésico es necesario para dar la escala. Por tanto, ambos métodos deben combinarse, suplementados por tanta información geodésica como pueda obtenerse por otros caminos, particularmente con la obtenida por satélites artificiales.

### ONDULACIÓN DEL GEOIDE (N).

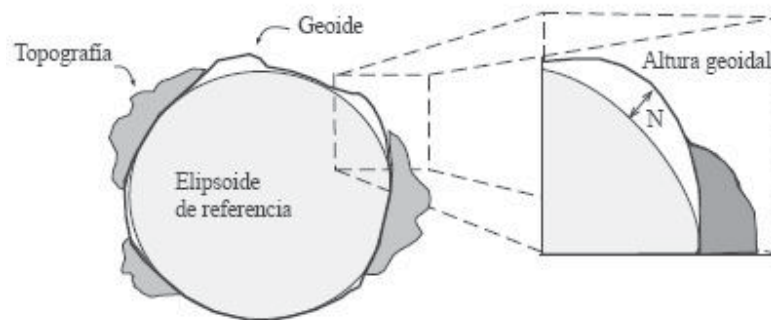
La diferencia que existe entre el geoide y el elipsoide se conoce como ondulación del geoide N. Gracias a esta variante se puede describir el irregular comportamiento del geoide. Conociendo la ondulación geoidal (N) se puede calcular la altura ortométrica (H) o altura sobre el NMM de algún punto de observación en particular todo esto a partir del valor de la altura sobre el elipsoide (h) referida por un equipo GPS, esta situación se expresa mediante la siguiente fórmula:  $H = h - N$

Una vez determinada la corrección ortométrica, se aplica a la altura geométrica obteniéndose la altura ortométrica que representa la verdadera altura del punto del terreno respecto del geoide, medida a lo largo de la línea de la plomada desde el terreno al geoide (ligeramente curvada). La simbolizamos con H.

Si disponemos del valor de la altura elipsoidal de dicho punto respecto del elipsoide de referencia (h), podremos conocer la ubicación del geoide respecto del elipsoide, valor que se denomina Ondulación del Geoide y se simboliza con la letra N, por diferencia de alturas.

Es decir que:  $N = h - H$

Existen modelos de geoide que nos permiten obtener el valor de N con solo conocer las coordenadas latitud y longitud del punto. Estos modelos fueron obtenidos por interpolación a partir de puntos del terreno con N conocida. Entre los modelos conocidos podemos citar el OSU 91 y el EGM 96. La precisión de un modelo de geoide depende de la cantidad de puntos con N conocida, por ello surge la recomendación de realizar medición GPS diferencial en puntos de altura geométrica conocida. Si el valor de N es preciso, podremos obtener altura geométrica (H) precisa a partir de altura elipsoidal (h) medida con precisión. Es decir  $H = h - N$



### DETERMINACIÓN DE LA ONDULACIÓN MEDIANTE SATÉLITES.

Por técnicas de posicionamiento global (GPS) pueden obtenerse las coordenadas latitud  $\phi$ , longitud  $\lambda$  y altura  $h$ , sobre el elipsoide.

Conociendo la altitud  $H$  de los puntos sobre el geoide o nivel medio del mar mediante una nivelación, la ondulación  $N$  viene dada por  $N = h - H$ .

La nivelación tiene que ir apoyada en medidas de gravedad dado que las superficies equipotenciales no son paralelas y la suma de los desniveles a lo largo de un itinerario cerrado no es cero.

La variación del potencial entre dos superficies de nivel o equipotenciales separadas una distancia diferencial es igual al producto del gradiente del campo por el diferencial de distancia.

$$Du = -\text{grad } U \, ds = \text{gravedad } ds$$

La integral a lo largo de un itinerario cerrado ó  $\oint g \, ds$  es cero por ser conservativo el campo de la gravedad.

Combinando medidas de desniveles con valores de gravedad se obtienen diferencias de potencial y estas se convierten a altitudes ortométricas  $H$  medidas a lo largo de la plomada, con la fórmula:

$$H = \left( \int g \, ds \right) / (g + 0.0424 H)$$

### 2.1.2 MODELO GEOIDAL MEXICANO ACTUAL (GGM06).

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) desarrolló un nuevo modelo geoidal gravimétrico para la República Mexicana (GGM06), el cual tiene una mayor precisión que su antecesor el GGM05. El refinamiento en la solución se basa principalmente en la incorporación de una mayor cobertura en los valores de gravedad puntual, el uso de un modelo de topodensidad nacional, además de un modelo geopotencial global en coeficientes armónicos esféricos más reciente y a las mejores teorías y prácticas del método de elaboración. El lanzamiento de esta solución geoidal y su continuo mejoramiento, pretende aprovechar la determinación de alturas con los sistemas de posicionamiento global por satélite, permitiendo a los usuarios obtener alturas ortométricas a partir de las geodésicas. Pensando en un futuro llegar a complementar la nivelación diferencial de precisión, con el subsiguiente ahorro en costos y tiempo. Además se pretende realizar un refinamiento continuo conforme se detecten áreas de oportunidad o se vayan dando mejoras tanto en el grado de cobertura de información geodésica de referencia como en los procesos, para ir a la par de los requerimientos de los usuarios.

Como valor agregado se tiene el modelo digital de elevaciones continuo para México y los archivos y modelos digitales de los efectos y correcciones que se generan durante el proceso.

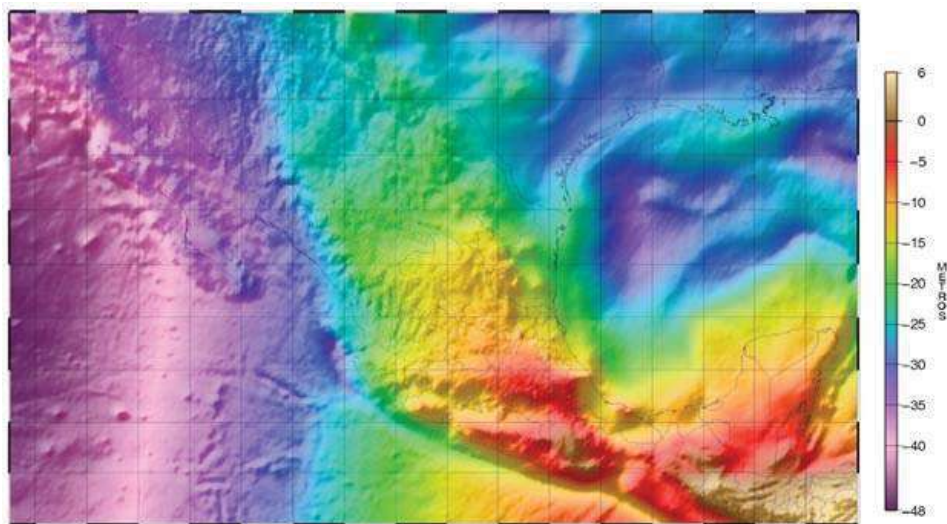
### MODELOS GEOIDALES EXISTENTES PARA MÉXICO

La actividad gravimétrica en el INEGI comienza desde la década de los 80's, y ha sido influenciada por las condiciones y necesidades predominantes en cada momento, ha pasado por varios proyectos y programas de cooperación con diferentes Instituciones, lo que ha dado como resultado una cantidad de alrededor de 30,000 puntos con valor de gravedad medidos a lo largo y ancho de todo el país. Dentro de uno de esos proyectos se acordó la cooperación con el National Geodetic Survey (NGS) de los Estados Unidos de América, para proporcionarles los valores puntuales gravimétricos como parte de los insumos para determinar un modelo geoidal para nuestro país, resultando el modelo geoidal México97, para su determinación se usaron más de un millón de valores de gravedad terrestre y marina, el método de cálculo utilizado fue el conocido como "remove restore" y la técnica Transformada rápida de Fourier. El resultado fue una malla de alturas geoidales con espaciamiento de 2'x2' en latitud y longitud, referido al elipsoide del Sistema Geodésico de

Referencia 1980 (GRS80), en el Marco de Referencia Terrestre Internacional 1994 (ITRF94 época 1996.0). Previo a este modelo geoidal, en el país se utilizaron los siguientes modelos geoidales; el elaborado por la Universidad Estatal de Ohio (OSU91A), y el Modelo de Potencial de la Tierra (EGM96) elaborado conjuntamente por la Agencia Nacional de Mapeo e Imágenes (NIMA), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Universidad Estatal de Ohio, estos modelos en su momento ayudaron en la determinación de alturas geoidales, requeridas en los procesos Institucionales.

Con el uso cada vez más generalizado del sistema de posicionamiento global, y buscando un mayor aprovechamiento de esta técnica, se vio la necesidad de determinar una nueva solución geoidal para el país, la cual estuviera más acorde a los requerimientos actuales. En este contexto se planearon las acciones inmediatas para conseguir este fin. Lo primero fue elegir el método que se adecuara a las condiciones de México, tanto en los insumos existentes como en la solidez teórica, eligiendo determinar un geoide gravimétrico bajo el esquema Stokes-Helmert.

El resultado fue un modelo geoidal submétrico, el cual será refinado hasta llegar a nivel centimétrico. La obtención de la primer solución en el año 2004 permitió ubicar aquellos lugares donde se requería de una mayor cobertura de valores de gravedad puntual, conocer también aquellas zonas que de acuerdo al resultado requieren mayor atención en la validación de los insumos existentes, para definir la influencia de cada uno en la precisión final y decidir cuales de ellos es necesario mejorar o cambiar. Para las versiones del 2005 y 2006, ya fue posible contar con un modelo de topodensidad, el cual no se tenía en la primera versión, además se hizo la adecuación de algunos de los insumos, utilizando aquellos mejorados.



**GGM06: Modelo Digital de alturas Geoidales para el área Mexicana de 2006**

### PRECISIÓN ESTIMADA

La evaluación para determinar la precisión obtenida en la solución geoidal, se realizó de la siguiente manera:

- Utilizando la altura ortométrica (H) de los bancos de nivel de precisión (BNP) junto con observaciones de altura geodésica (h) obtenida con GPS, se calculó su altura geoidal (N) con la ecuación  $N = h - H$ .

La altura geoidal obtenida de esta manera se toma como parámetro de referencia contra el cual se compara la altura geoidal del modelo correspondiente a cada banco, la diferencia de ambas alturas geoidales se considera un error y en base a esos valores se obtiene el error medio cuadrático estimado.

- Se tuvo especial cuidado en que todos los bancos de nivel estuvieran ajustados al NAVD88. Tomando en consideración lo anterior se generó una tabla de diferencias para cada modelo y el resultado de comparar estos 1384 puntos fue el siguiente:

| GGM05                     |        | GGM06                     |        |
|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| Diferencia positiva mayor | 1.560  | Diferencia positiva mayor | 1.316  |
| Diferencia negativa mayor | -1.057 | Diferencia negativa mayor | -1.434 |
| Diferencia promedio       | -0.104 | Diferencia promedio       | -0.082 |
| Error medio cuadrático    | 0.356  | Error medio cuadrático    | 0.353  |
| Desviación estándar       | 0.356  | Desviación estándar       | 0.343  |

A pesar de que el número de puntos con diferencias mayores a 1 metro representan un porcentaje bajo en relación al total, es necesario detectar la fuente del sesgo que se presenta en esas zonas y corregirla.

Las diferencias obtenidas pueden deberse a:

- a) Un sesgo en el modelo geoidal en esa zona debido a faltas de exactitud o de cobertura en los insumos utilizados, como datos de gravedad puntual, modelos digitales de elevación, etc.
- b) Presencia de errores en los datos de altura geodésica inducidos por deficiencias en la aplicación de la metodología de posicionamiento con GPS/BNP, o durante su procesamiento.
- c) El dato de altura ortométrica de los BNP ajustados a la red NAVD88 haya perdido vigencia debido a desplazamientos del terreno, como subsidencia local, movimientos de corteza terrestre, entre otros. En este caso el problema podría derivarse porque las observaciones GPS han sido realizadas en una época distinta a la del correspondiente al ajuste de la red NAVD88.

## DATOS DE ENTRADA

### Gravedad terrestre

En los cuatro últimos años se le ha dado mayor impulso a los levantamientos gravimétricos y se ha puesto especial cuidado en rescatar aquellos valores que en su momento fueron obtenidos en campo pero que por diferentes causas no se habían procesado.

Un aspecto que esta tomándose en cuenta es realizar una densificación enfocada a cubrir de manera regular todo el país, para lo cual está implantándose una metodología para que la distribución puntual de la gravedad permita obtener un modelo geoidal con una precisión uniforme en todo México.

Anteriormente la observación de la gravedad se realizaba sobre las vías de comunicación, principalmente en aquellas que estaban pavimentadas, y en menor porcentaje en marcas geodésicas existentes de programaciones anteriores del Instituto, ocasionando una irregular cobertura a nivel nacional, con zonas densamente cubiertas y otras con deficiente cobertura.

En la actualidad la medición se realiza con algunos criterios básicos que ayuden a distribuir mejor la cobertura nacional, ésta se basa en la carta topográfica 1:50,000, la cual se divide en una gradícula

con celdas de 5'x5', en las cuales se debe medir por lo menos cuatro puntos regularmente distribuidos, si dentro de la mencionada celda se encuentra algún punto monumentado posicionado con GPS, se le dará preferencia para medirle la gravedad.

Un aspecto en el que se ha puesto particular interés es en el mantenimiento y depuración de la base de datos gravimétricos, la cual se ha validado, actualizado y aumentado con toda aquella información que en su momento no fue anexada por diferentes causas.

### **Gravedad Marina**

Los datos de gravedad marina fueron derivados de la misión satelital TOPEX/Poseidón, la cual fue lanzada en 1992, en un proyecto conjunto entre el Centro Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES) y la NASA para modelar la topografía de la superficie oceánica.

### **Modelo Geopotencial Global**

En el proceso de una solución geoidal gravimétrica, el modelo geopotencial interviene con una doble función, por una parte provee una referencia para calcular la anomalía de gravedad de Helmert (necesaria en el esquema de solución de Stokes-Helmert) en áreas con escasez de datos y por otra, sirve como geoide de baja frecuencia al que se le suma la parte residual (llamada también parte de alta frecuencia).

Durante los procesos de cálculo computacional fueron utilizados los modelos geopotenciales EGM96, y el Grace Gravity Model (GGM02) del Instituto alemán GFZ.

### **Modelos digitales del terreno**

Para el cálculo del modelo geoidal son necesarios varios pasos intermedios para determinar efectos y correcciones relacionados con el campo de gravedad. La determinación de estos depende en gran medida de los modelos digitales de elevación en diferentes resoluciones y coberturas.

- Un modelo digital de elevaciones detalladas en resolución de 1"x1" que debe cubrir 8 grados alrededor de la zona de cálculo. El modelo utilizado fue el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), el cual fue elaborado en el INEGI, a partir de los modelos existentes en formato de carta 1:50000 y complementado con información del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
- También un modelo de alturas medias, en dos resoluciones distintas 30"x30" y 2.5'x2.5' con cobertura de 11 grados alrededor de la zona de cálculo, el cual se obtuvo combinando alturas promedio del CEM y del modelo Global de Topografía con resolución de 30" (GTOPO30), del USGS (United States Geological Center).
- Por último es necesario un modelo global de alturas para estimar efectos topográficos de zonas lejanas a los puntos de cálculo, se utilizó el modelo global de la Universidad Tecnológica de Graz en Alemania (TUG87).

### **Otros modelos utilizados**

La información del campo de gravedad más allá de los 8 grados de la zona de cálculo, también afecta la determinación local del geoide, y para estimar estos efectos se utilizó un modelo geopotencial de cobertura global. Para el cubrimiento global fueron utilizados los modelos EGM96

y el modelo de campo de gravedad global Grace gravity model GGM-02 elaborado por un equipo multinacional de USA y Alemania.

Además de toda esta información se requiere aplicar una corrección por densidad de masas topográficas, para lo cual fue necesario incluir un modelo regional de densidad superficial, el cual fue elaborado en el INEGI como un derivado de la carta geológica y utilizado para el cálculo del GGM06.

### **MÉTODO DE CÁLCULO**

El GGM06, es un geoide gravimétrico y fue calculado usando la técnica Stokes-Helmert, el planteamiento de esta técnica tiene un soporte teórico sólido y fue desarrollada en la Universidad de New Brunswick (UNB) bajo el liderazgo del Dr. Petr Vanicek con el objetivo de considerar todos los fenómenos que afectan la posición del geoide en más de 1cm.

La técnica utilizada se basa en la evaluación de la integral de Stokes dentro de un espacio armónico de Helmert, para determinación de un geoide gravimétrico preciso y consta de los siguientes pasos básicos:

1. Formulación del problema de valor de frontera sobre la superficie terrestre.
2. Evaluación de las anomalías de gravedad de Helmert sobre la superficie terrestre.
3. Continuación descendente de las anomalías de gravedad de Helmert hacia el geoide.
4. Integración de Stokes (solución para el problema del valor de frontera de Stokes).
5. Transformación de alturas geoidales del espacio de Helmert al espacio real.

La implementación computacional de estos pasos se realizó con el paquete de programas SHGEO, que es propiedad de la UNB y fue desarrollado por el equipo del Departamento de Geodesia y Geomática.

### **2.1.3.- MODELO GEOIDAL GLOBALES.**

Los modelos de geoide globales, se llaman así por que ajustan observaciones de distinto tipo a lo largo de todo el mundo y producen una solución a escala global. Este tipo de modelos, cuya precisión ha ido en rápido aumento en los últimos años, tienen poca resolución.

Esto significa que no pueden dar cuenta de las ondulaciones del geoide que se producen a escala de pocos kilómetros. Estos modelos constituyen una buena referencia general y se pueden tomar como base para desarrollos localizados. Los de uso mas frecuente son los desarrollados en la Ohio State University denominados OSU89 y OSU91A (Rapp et al, 1991), y más recientemente, el modelo EGM96 de NIMA (Lemoine et al, 1996) del cual hablaremos a continuación.

#### **MODELO GEOIDAL GLOBAL EGM96**

El modelo EGM96 [ Lemoine et al, 1996 ], es una selección obligada, ya que es el modelo geopotencial desarrollado para dar apoyo al sistema WGS84, base principal en la actualidad del posicionamiento por satélite y el que ha tenido hasta el momento, el tratamiento mas riguroso y consistente en su cálculo.

El modelo de geoide EGM96 es un modelo global en una grilla de 0.25 x 0.25 grados. Fue creado desde el modelo armónico esférico EGM96 completo hasta grado y orden 360.

A finales del año de 1996 fue presentado en el Internacional Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy, en Tokio, el modelo de geopotencial EGM96 (Earth Gravity Model 1996). Fue desarrollado mediante la colaboración de distintos centros de investigación, fundamentalmente al

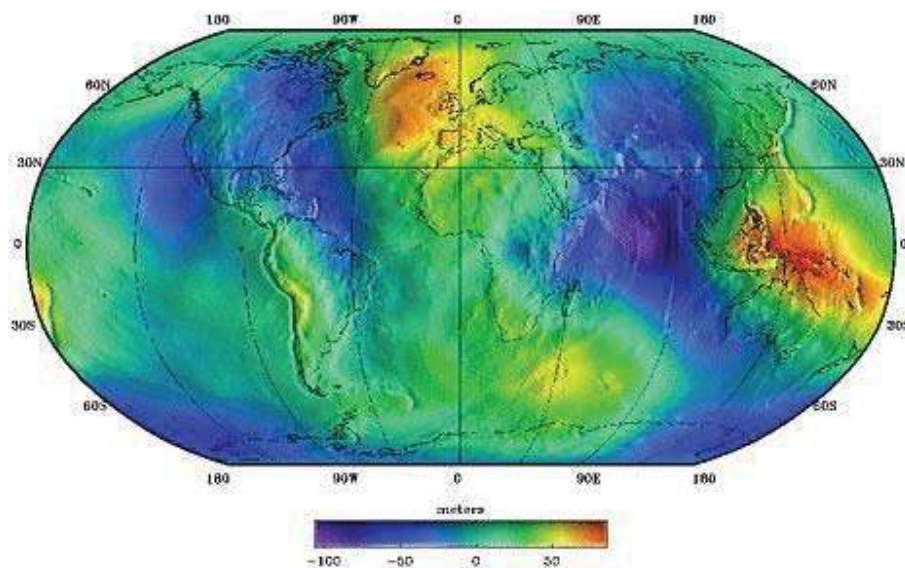
Laboratory for Terrestrial Physics –NASA Goddard Space Flight Center y la National Imagery and Mapping Agency (antes Defense Mapping Agency), aunque también han colaborado la Hughes – STX Corporation, Ohio State University y The University of Texas at Austin.

Se han utilizado para su elaboración gran cantidad de datos de la gravedad, incluso de zonas en donde antes no se disponían (zonas del océano Ártico, Groenlandia y la Antártida), observaciones láser a satélites (TOPEX/POSEIDON, Stella, Starlette, SEASAT, Peole, LAGEOS, etc.), observaciones Doppler a satélites (SEASAT, RADCAL, OSCAR-14, Nova-1, HILAT, GEOSAT, etc.), altimetría de satélite (TOPEX/POSEIDON, GEOSAT y ERS-1), observaciones GPS (TOPEX/POSEIDON, GPS/MET y ELJVE), observaciones TDRSS (Tracking and Data Relay Satellite System) al satélite ERS-1, observaciones SST Doppler (Satellite to Satellite Tracking) entre los satélites GEOS-3 y ATS-6, observaciones DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) a los satélites TOPEX/POSEIDON y SPOT-2 y, observaciones ópticas a satélites (GEOS-1, GEOS-2, Midas-4, BE-C, DI-D, Echo-IRB, etc.)

### DESVENTAJAS

Soluciones globales de este tipo como EGM96 (figura siguiente), GPM98, OSU91, etc., pueden conseguirse de manera gratuita para aplicar sus alturas en los trabajos geodésicos, pero cuentan con graves inconvenientes: aunque algunos de ellos sean considerados como de *ultra alto grado*, tienen una resolución muy pobre, es decir, en áreas con cientos de kilómetros cuadrados, el valor de altura geoidal permanece constante; con estos modelos no es posible detectar la diferencia de altura geoidal entre un punto y otro que se encuentra a pocos kilómetros

Por otra parte, existen modelos regionales que a pesar de no tener el problema de baja resolución, poseen un error asociado demasiado grande para los requerimientos que exigen las diferentes aplicaciones a nivel nacional. El más reciente de ellos, hecho para el área mexicana, es el llamado MEX97, desarrollado por el Instituto Nacional de Medición Geodésica (National Geodetic Survey) de Estados Unidos de América, cuyo error asociado es de 3 metros.



**Modelo Geoidal Global EGM 96**

#### **2.1.4.- APLICACIONES DE LA SOLUCION GEOIDAL.**

##### **CARTOGRAFÍA**

En la producción de mapas de cualquier escala se necesita tener una red de puntos distribuidos apropiadamente sobre el terreno (control geodésico) con coordenadas de posición horizontal y vertical bien determinadas; así, se evitan deformaciones de la imagen final. En este sentido, el *Geoide* es la superficie de referencia vertical para el sistema de alturas ortométricas usado en el control geodésico y, por lo tanto, para las curvas de nivel. También, con esto es posible establecer relaciones de altura entre mareógrafos y dar paso a la determinación de un punto fijo y único de referencia vertical para nuestro país llamado *dátum* vertical.

##### **PROYECTOS DE INGENIERÍA**

Algunas construcciones subterráneas requieren registrar las posiciones horizontal y vertical en toda su estructura, y no es recomendable utilizar sistemas inexactos para futuras referencias. Por otro lado, recordando que el *Geoide* es una superficie equipotencial (superficie de nivel del campo gravitacional), es factible desarrollar un análisis para deducir otras superficies de este tipo. En la construcción de grandes estructuras como presas, puentes, entubamiento de agua y proyectos de irrigación, es de vital importancia conocer la forma de las superficies equipotenciales del campo de gravedad de la zona; esto permite calcular la inclinación y magnitud adecuadas de la construcción, con lo cual se puede predecir su comportamiento en situaciones extremas.

##### **PROTECCIÓN CIVIL**

La combinación de información de un modelo digital de elevaciones con superficies equipotenciales hace posible diseñar modelos sobre la dirección de los escurrimientos de agua y localizar con anticipación las zonas con riesgo de inundación.

##### **ECOLOGÍA**

En las últimas décadas las acciones humanas de extracción de agua, combustible y minerales han provocado efectos en el ambiente. Uno de éstos es el movimiento (generalmente hundimiento) del suelo, que se estudia con variaciones en la posición vertical de puntos sobre el terreno, variaciones del nivel medio del mar, así como en la gravedad y la pendiente. Todas estas observaciones se facilitan y resultan menos costosas si un modelo geoidal centimétrico está disponible.

##### **ORDENAMIENTO TERRITORIAL**

En este rubro, ha sido reconocida la necesidad de concentrar en bases de datos los registros de distintos tipos de zonas, terrenos o propiedades, para lo cual es requerido el uso de coordenadas referidas a las redes geodésicas (horizontal y vertical).

##### **OCEANOGRAFÍA**

El geoide es la superficie de referencia para la batimetría (nivel del terreno bajo el mar), líneas de costa, alturas relativas de dispositivos, como los mareógrafos, y otros objetos en el mar.

##### **LÍMITES INTERNACIONALES**

El mar territorial se establece en función de líneas bases rectas y normales que deben estar ligadas a un sistema consistente y global.

## GEOFÍSICA

El geoide es una base de partida para la investigación de la densidad dentro de la Tierra; apoya el registro del movimiento de placas tectónicas y la deformación geométrica de las mismas, además de ser la referencia para detectar los cambios en la gravedad provocados por movimientos en la corteza terrestre. Puede servir, también, como soporte en la prospección de yacimientos minerales o petrolíferos.

## CONTROL SATELITAL

Desde el momento en que un satélite es puesto en movimiento, resulta útil el conocimiento de las superficies equipotenciales porque permiten establecer y corregir su rumbo, pues los satélites se mueven en órbitas que pertenecen precisamente a este tipo de superficies. El geoide hará las veces de un origen para las trayectorias en las que pueden transitar sin cambiar de órbita.

## 2.2.- ELIPSOIDE DE REVOLUCION.

### INTRODUCCION A LA TEORIA DEL ELIPSOIDE.

Históricamente, es Newton quien sienta las bases de una hipótesis elipsoidal al estudiar la atracción de esferas, y al comprobar que la rotación terrestre ha debido determinar su aplanamiento, al propio tiempo que la medida de un arco de meridiano efectuada por Picard (1669-70), entre Sourdon y Malvoisine, le lleva a estimar, para una Tierra homogénea, un aplanamiento del orden de  $1/231$ . A partir de entonces se suceden las medidas, cada vez más precisas, que van determinando la adopción de elipsoides concretos en los cálculos geodésicos de cada país.

Así, merecen especial mención las medidas de Delambre y Mechain de un arco de meridiano entre Dunkerque y Barcelona (1792-98), junto con las de Struve (1849-52) entre Hammerfest (Noruega) y el Danubio, y el cálculo de numerosas triangulaciones por Everest, Airy, Bessel, Clarke, etc., originan el establecimiento de diversos elipsoides de referencia, entre los cuales citaremos los siguientes:

| <b>Autores<br/>año</b> | <b>Semieje<br/>(en m)</b> | <b>Aplanamiento</b> |
|------------------------|---------------------------|---------------------|
| Delambre<br>1799       | 6375653                   | 1/334               |
| Walbeck<br>1810        | 6376895                   | 1/302.78            |
| Everest<br>1830        | 6377276                   | 1/300.8             |
| Bessel<br>1841         | 6377397                   | 1/299.15            |
| Airy 1849              | 6377480                   | 1/299.33            |
| Struve<br>1860         | 6378298                   | 1/299.73            |
| Clarke<br>1880         | 6378249                   | 1/293.5             |
| Helmert<br>1907        | 6378200                   | 1/298.3             |

|                    |          |         |
|--------------------|----------|---------|
| Hayford<br>1909    | 6378388  | 1/297   |
| Krassovsky<br>1940 | 6378245  | 1/298.3 |
| Hough<br>1956      | 6378270> | 1/297   |

El elipsoide de Hayford fue adoptado por la IAG (Unión Geodésica Internacional), en su reunión de Madrid (1924), como elipsoide internacional. Posteriormente, basándose en la observación de satélites artificiales, han sido propuestos, entre otros, los siguientes:

| <b>Autores/<br/>año</b> | <b>Semieje<br/>(en m)</b> | <b>Aplanamiento</b> |
|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| Kaula 1961              | 6378163                   | 1/298.24>           |
| Veis 1965               | 6378142                   | 1/298.25            |
| Lambeck<br>1971         | 6378140                   | 1/298.25            |
| Rapp 1973               | 6378142,8                 | 1/298.256           |
| Khan 1973               | 6378142                   | 1/298.255           |
| Gaposchkin<br>1973      | 6378140,4                 | 1/298.256           |
| WGS84<br>1984           | 6378137,01                | 298.257223563       |

En su reunión de Hamburgo, la IAU (Unión Astronómica Internacional) adoptó el siguiente elipsoide:

IAU(1964)  $a = 6.378.160\text{m}$ ,  $f = 1/298.25$ , que fue más tarde confirmado por la IAG en su reunión de Lucerna y por la IUGG (Unión Geodésica y Geofísica Internacional) como Sistema de referencia 1967, con  $f = 1/298.247$ . Finalmente, en la XVII Asamblea General de la IAG, celebrada en Canberra (1979) fue preconizado un nuevo cambio, aprobado por la IUGG en su resolución nº 7, que asigna al elipsoide terrestre las siguientes dimensiones:

IUGG (1980)  $a = 6.378.137\text{m}$ ,  $f = 1/298.257$ , y ha recibido el nombre de Sistema Geodésico de Referencia 1980. (GRS80)

Desde mediados del siglo pasado se ha considerado la posible conveniencia de aproximar la Tierra con un elipsoide triaxial. Algunos investigadores han tratado de determinar la posible variación del radio ecuatorial terrestre con respecto a su longitud geográfica, obteniendo la diferencia ( $a_1 - a_2$ ) entre los radios mayor y menor, y la longitud  $l$  correspondiente al radio  $a_1$ .

La diferencia ( $a_1 - a_2$ ), según las diferentes determinaciones parece oscilar entre 150 y 350 m. La longitud  $l$ , en promedio, es del orden de  $20' E$ , para determinaciones astrogeodésicas y del orden de  $15' W$ , en determinaciones gravimétricas o por satélites. Los resultados muestran una evidente disparidad, en los que parecen influir tanto el método seguido (astrogeodésico, gravimétrico o por satélites) como la carencia de suficientes datos en el mar, por lo que no parece aconsejable, de momento, su introducción en los cálculos geodésicos.

Paralelamente a los trabajos anteriores, desde el comienzo del s. XIX, ya Laplace, Gauss, Bessel, entre otros, se dieron cuenta de que la hipótesis de un modelo de Tierra elipsoidal no se podía mantener cuando se efectuaban observaciones con gran aproximación.

En otras palabras, que no se podía ignorar la desviación entre la normal al elipsoide y la vertical definida por la línea de la plomada, respecto a la cual vienen referidas las medidas. Ajustando las medidas de diversos arcos para la determinación de los parámetros del elipsoide  $a$  y  $f$ , surgían contradicciones que excedían mucho la exactitud observacional. Todo esto trae consigo la introducción de geode como superficie equipotencial correspondiente al nivel medio de los mares. Con la definición de geodesia propuesta por Helmert, se produce la transición a una nueva etapa de la geodesia, que se ha mantenido hasta mediados de este siglo.

Por tanto, durante el período comprendido entre 1880-1950 han predominado las determinaciones de tipo gravimétrico, que dan lugar a los elipsoides de Helmert, Heiskanen, Outila, etc. Los importantes trabajos de Hayford en USA en los que aplica las compensaciones isostáticas ideadas por Pratt y Airy hacia 1855, sirven para definir el elipsoide internacional (1924).

A partir de los años 30 se observa la tendencia a combinar diversos métodos (geométricos, astronómicos y gravimétricos) en las determinaciones geodésicas; tal es el caso del elipsoide de Krassovsky (1938). Geodesia por satélites y Geodinámica. Después de la segunda guerra mundial, la observación precisa de ocultaciones y eclipses, las triangulaciones por radar y, sobre todo, la observación mediante satélites artificiales, han dado lugar a enlaces entre continentes, al propio tiempo que han aumentado la precisión alcanzada. Concretamente, a partir de estas medidas, desde mediados de los años 60 se proponen nuevos elipsoides. Dicho de otro modo, el último capítulo de la historia de la geodesia viene marcada por los sucesivos progresos llevados a cabo en la geodesia con satélites.

### **LA TIERRA COMO UNA ESFERA.**

Aunque el problema de la geodesia tal y como lo entendemos hoy fue formulado durante el siglo XIX, la cuestión relativa a la figura de la tierra es muy antigua y aparece en todas las culturas. Solo refiriéndonos a la nuestra, en escritos de Homero y Tales encontramos la noción de una tierra como un disco rodeado por un océano.

Eratóstenes (275-195 a.C.) es considerado el creador de la geodesia, ya que por medidas simultáneas de altura (ángulo de elevación) del sol en Siena y Alejandría, comparadas con la medida en estadios entre ambas ciudades, calcula por primera vez el radio de la Tierra con error aproximado de un 15% por exceso.

Este método de medidas de arco ha seguido aplicándose hasta el presente. En efecto, aparte de los primeros trabajos de triangulación de Tycho-Brahe, es Snellius (1615) quien mide un arco de

meridiano de  $1^\circ$ , entre Alkmaar y Bergen-op-Zoom, en los Países Bajos, y obtiene el radio terrestre con un error por exceso del 3.3%.

Siguen a estas las medidas del abate Picard (1670) entre Sourdon y Malvoisine, que fija el valor del grado terrestre con un error del orden de 0.001.

### **MEDIDAS DE ARCO Y MODELO ELIPSOIDAL.**

Por esos mismos años Richer (1673) deduce que la longitud del péndulo que bate segundos es aproximadamente 2.8 mm. Más corta en Cayena que en París, de donde Newton y Huyghens concluyen que la Tierra es un elipsoide achatado. Por otra parte, la prolongación de las medidas de Picard hasta Dunkerque y Collioure por J. Cassini, Maraldi y La Hire (1700-1718), conduce equivocadamente a la conclusión de que la Tierra es un elipsoide alargado de revolución.

La famosa discusión que se origina entre los partidarios de Cassini a favor de un elipsoide alargado y los que se inclinan por un elipsoide achatado (siguiendo a Newton), quedó resuelta a favor de estos últimos:

a) por las misiones geodésicas enviadas por la Academia Francesa en 1735, una a Laponia (1736-1737), dirigida por Maupertuis, Clairaut, Celsius, etc., y la otra a Perú (1735-1744), dirigida por Goudin, Bouguer y La Condamine, en la que colaboran Jorge Juan y Antonio de Ulloa, de hecho, se llevaron a cabo dos medidas independientes por franceses y españoles.

b) por los trabajos de MacLaurin (1740), que demostraron la posibilidad de que un elipsoide achatado fuera la figura de equilibrio para una masa fluida homogénea en rotación y de Clairaut (1743) que dio el valor del achatamiento en función de la gravedad y de la velocidad de rotación.

En el período 1792-98 es medido por los franceses, bajo la dirección de Delambre y Mechain, un nuevo meridiano de  $9^\circ 40'$ , desde Dunkerque a Montjuich (Barcelona), tales medidas sirvieron de base para la definición del metro y del sistema métrico decimal.

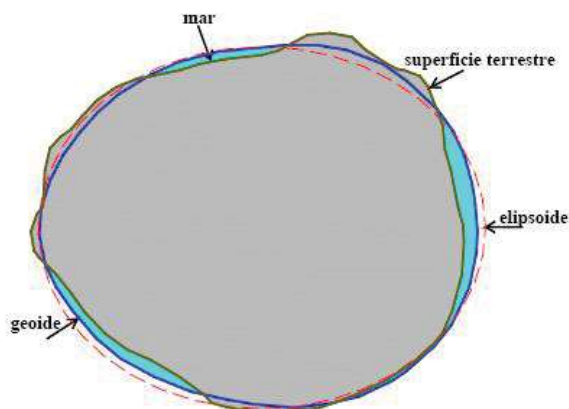
El s. XIX, aparte del establecimiento de la fórmula fundamental de la gravimetría por Stokes (1849), se caracteriza por las numerosas e importantes triangulaciones efectuadas en, Francia, España, Alemania, Inglaterra, Rusia, India, etc., y en los enlaces de estas redes entre España-Francia, Francia-Inglaterra, España-África, etc., surgiendo así un notable conjunto de elipsoides de referencia (Bessel, Clark, Everest, etc.), y la Asociación Geodésica Internacional (1886), cuyo primer presidente fue el general español Ibáñez de Ibero.

Las diversas mediciones de arco de meridiano terrestre, demostraron que el globo terrestre era representable por un elipsoide, pero aparecieron discrepancias en lo concerniente a las dimensiones que se debía asignarle. Se recurrió entonces a compensar los datos existentes por el método de mínimos cuadrados que hacia 1806 había ideado el matemático francés Adrien Marie Legendre.

En 1841 el astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel creó el elipsoide que lleva su nombre utilizando las mediciones de diez meridianos europeos. En 1880 y 1886 hizo lo propio A.R. Clarke, usando otros grupos de arcos de meridiano integrados por la medición de Perú y por mediciones hechas en Rusia y en la India. Cada científico produjo un elipsoide de referencia, que se conoció con su nombre y se usó como tal durante cierto tiempo en las tareas geodésicas. Otro elipsoide que prestó grandes servicios fue propuesto en 1909 por el geodesta norteamericano J. Hayford. Para su propósito, Hayford se valió de la triangulación norteamericana y obtuvo un elipsoide cuyo radio

ecuatorial resultó ser de 6,378,388 m y cuyo achatamiento resultó ser de 1/297. En la Asamblea de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional del año 1924, en Madrid, se resolvió aceptar como elipsoide de referencia al encontrado por Hayford en 1909 (Elipsoide Internacional de 1924). Estas resoluciones tuvieron vigencia hasta el advenimiento de las modernas técnicas satelitarias.

La obtención de una superficie de referencia, con una definición matemática sencilla que permita efectuar cálculos, es imprescindible para poder realizar la proyección de los puntos del relieve terrestre sobre la misma y permitir la elaboración de mapas y planos. El Geoide no puede ser la superficie de referencia adoptada, pues, como hemos dicho, es muy compleja e irregular. Se toma entonces la hipótesis de escoger un elipsoide de revolución que se adapte en lo posible al geoide y que se define por unos parámetros matemáticos, denominándose Elipsoide de referencia.

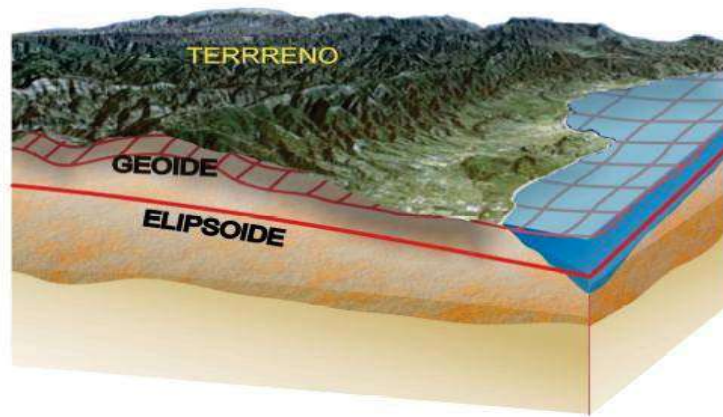


La elección del elipsoide es más que justificada, por razones de sencillez en su definición matemática y por qué se ajusta con aproximación de primer orden al Geoide. Hasta aquí, estaríamos hablando de lo que podemos denominar Elipsoide Medio o General, que se determinaría teniendo en cuenta los siguientes condicionantes:

1. El centro gravitatorio terrestre debe coincidir con el centro del elipsoide.
2. El plano definido por el Ecuador terrestre debe coincidir con el del elipsoide.
3. La suma de los cuadrados de las alturas geoidales debe ser mínima.

Dada la gran dificultad que supondría realizar las observaciones necesarias para concretar este Elipsoide General, las distintas naciones han utilizado los llamados Elipsoides Locales, que constituyen una aproximación admisible en zonas geográficas concretas. Esto suele hacerse (según Bomford, 1980) adoptando valores arbitrarios (los que más convengan) para la latitud y longitud geodésicas en un punto de origen, además de una altura sobre el elipsoide. Posteriormente, mediante la utilización de las ecuaciones matemáticas necesarias, se busca mantener el paralelismo entre el eje menor del elipsoide y el eje de rotación de la Tierra.

En la siguiente figura veremos la comparación entre las tres superficies estudiadas, es decir, entre la superficie terrestre real, el geoide y el elipsoide de referencia.



Los trabajos geodésicos llevados a cabo por los diferentes países han dado lugar a la definición de numerosos elipsoides de referencia, de forma que las medidas efectuadas por cada país están referidas al elipsoide elegido, lo que dificulta sobremanera la conexión de trabajos de ámbito internacional.

Como es lógico, la tendencia desde entonces ha sido la de intentar establecer una cartografía uniforme, referida a un mismo elipsoide. En este sentido, y haciendo un poco de historia, fue Hayford, en el año 1910, el que estableció un elipsoide para la representación de EE.UU., que fue adoptado en el año de 1924 por la Asamblea Internacional de Geodesia y geofísica como Elipsoide Internacional de Referencia, con los parámetros:

$$a = 6.378.288,00$$
$$f = 1/297$$

Este elipsoide fue perfeccionado con posterioridad gracias a determinaciones obtenidas mediante satélites artificiales, estableciendo uno con parámetros muy parecidos, que se adoptó como internacional, en 1964, por la Unión Astronómica Internacional, en Hamburgo. Los parámetros fueron los siguientes:

$$a = 6.378.160,00$$
$$f = 1 / 298,25$$

Pocos años después, en 1967, basándose en nuevos datos disponibles, estableció unos nuevos parámetros para este elipsoide. Son los siguientes:

$$a = 6.378.142 \pm 6m$$

$$f = 1/298,255 \pm 0,005$$

Los parámetros que definen todo elipsoide de revolución, y las relaciones entre ellos, son los siguientes:

Semieje mayor...

$$a$$

Semieje menor...

$$b$$

Aplanamiento...

$$f = \frac{a - b}{a}$$

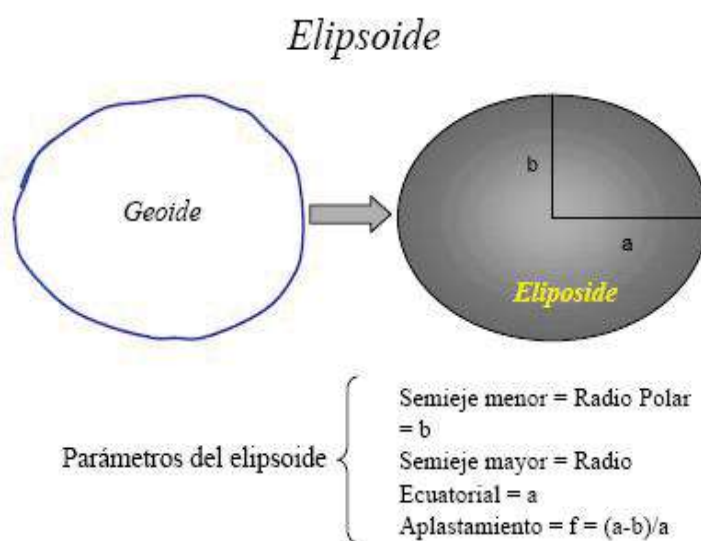
Excentricidad...

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

2ª Excentricidad

$$e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$$

Los parámetros del elipsoide se representan en la siguiente Fig.



A continuación se muestra una tabla de los principales elipsoides de referencia que han sido utilizados en cálculos geodésicos y en la Cartografía en general.

| Nombre del elipsoide         | a                    | b                    | a                | e               |
|------------------------------|----------------------|----------------------|------------------|-----------------|
| Airy 1830                    | 6,377,563.396        | 6,356,256.909        | 299.32496        | 0.081673        |
| Modified Airy                | 6,377,340.189        | 6,356,034.448        | 299.32496        | 0.081673        |
| Australian National          | 6,378,160.000        | 6,356,774.719        | 298.25000        | 0.081820        |
| Bessel 1841 (Namibia)        | 6,377,483.865        | 6,356,165.383        | 299.15281        | 0.081697        |
| Bessel 1841                  | 6,377,397.155        | 6,356,078.963        | 299.15281        | 0.081697        |
| Clarke 1866                  | 6,378,206.400        | 6,356,583.800        | 294.97869        | 0.082272        |
| Clarke 1880                  | 6,378,249.145        | 6,356,514.870        | 293.46500        | 0.082483        |
| Delambre 1800                | 6,375,635.000        | 6,356,564.000        | 334.00000        | 0.077288        |
| Everest (India 1830)         | 6,377,276.345        | 6,356,075.413        | 300.80170        | 0.081473        |
| Everest (Sabah Sarawak)      | 6,377,298.556        | 6,356,097.550        | 300.80170        | 0.081473        |
| Everest (India 1956)         | 6,377,301.243        | 6,356,100.228        | 300.80170        | 0.081473        |
| Everest (Malaysia ) 1969     | 6,377,295.664        | 6,356,094.668        | 300.80170        | 0.081473        |
| Everest (Malay&Sing ) 1948   | 6,377,304.063        | 6,356,103.039        | 300.80170        | 0.081473        |
| Everest (Pakistan)           | 6,377,309.613        | 6,356,108.571        | 300.80170        | 0.081473        |
| Modified Fischer 1960        | 6,378,155.000        | 6,356,773.320        | 298.30000        | 0.081813        |
| Helmert 1906                 | 6,378,200.000        | 6,356,818.170        | 298.30000        | 0.081813        |
| Hough 1960                   | 6,378,270.000        | 6,356,794.343        | 297.00000        | 0.081992        |
| Indonesian 1974              | 6,378,160.000        | 6,356,774.504        | 298.24700        | 0.081821        |
| Hayford 1910 (Internacional) | 6,378,388.000        | 6,356,911.946        | 297.00000        | 0.081992        |
| Krassovsky 1940              | 6,378,245.000        | 6,356,863.019        | 298.30000        | 0.081813        |
| GRS 80                       | 6,378,137.000        | 6,356,752.314        | 298.25722        | 0.081819        |
| South American 1969          | 6,378,160.000        | 6,356,774.719        | 298.25000        | 0.081820        |
| Struve 1924                  | 6,378,298.300        | 6,356,657.100        | 294.73000        | 0.082306        |
| Walbeck 1819                 | 6,376,896.000        | 6,355,833.000        | 302.80000        | 0.081210        |
| WGS 72                       | 6,378,135.000        | 6,356,750.520        | 298.26000        | 0.081819        |
| <b>WGS 84</b>                | <b>6,378,137.000</b> | <b>6,356,752.314</b> | <b>298.25722</b> | <b>0.081819</b> |

### ELIPSOIDE USADO EN MEXICO

En el Continente Americano y por lo que respecta a México en lo particular, se había venido usando el Elipsoide de Clarke de 1866, asociado al NAD27. En particular el elipsoide utilizado actualmente para los trabajos geodésicos en México es el GR S80, que está asociado al sistema de referencia ITRF92 época 1988.0

Sus parámetros fundamentales son:

|                                                   |    |                                                            |
|---------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------|
| a = 6, 378,137.000; b = 6, 356,774.719            |    |                                                            |
| Achatamiento $f = 1/298.2570158251 = 0.003352813$ |    |                                                            |
| Perímetro en el ecuador = 40,075.017 Km.          |    |                                                            |
| Velocidad Angular                                 | w  | 7 292 115x10 <sup>-11</sup> rad/seg                        |
| Constante Gravitacional Geocéntrica               | GM | 3 986 005x10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /seg <sup>2</sup> |
| Factor dinámico de la Tierra                      | J2 | 108 263x10 <sup>-8</sup>                                   |

Sus constantes geométricas derivadas son:

|                                           |                 |                      |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------------|
| Semieje menor                             | b               | 6 356 752.314 1 m    |
| Excentricidad lineal                      | E               | 521 854.009 7 m      |
| Radio polar                               | c               | 6 399 593.625 9 m    |
| Primera excentricidad al cuadrado         | e <sup>2</sup>  | 0.006 694 380 022 90 |
| Segunda excentricidad al cuadrado         | e' <sup>2</sup> | 0.006 739 496 775 48 |
| Achatamiento                              | f               | 0.003 352 810 681 18 |
| Recíproco del achatamiento                | f               | -1 298.257 222 101   |
| Cuadrante meridiano                       | Q               | 10 001 965.729 3 m   |
| Radio medio                               | R1              | 6 371 008.771 4 m    |
| Radio de la esfera de la misma superficie | R2              | 6371 007.181 0 m     |
| Radio de la esfera del mismo volumen      | R3              | 6 371 000.790 0 m    |

### 2.3.- DETERMINACIONES ALTIMETRICAS EN GEODESIA (ALTURA ELIPSOIDAL, COTA ORTOMETRICA, ONDULACION GEOIDAL Y ALTURA TOPOGRAFICA)

Las coordenadas geodésicas ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ) determinan la posición de la proyección de un punto de la superficie real de la Tierra sobre el elipsoide, según la normal a éste.

Pues bien, en este momento tenemos nuestro punto situado sobre el elipsoide, pero es necesario situarlo sobre la superficie terrestre si es que vamos a trabajar con él. Para ello, nos bastará con saber cuál es la altura de dicho punto sobre la superficie del elipsoide (la cual se medirá, obviamente, sobre la vertical geodésica), que se conoce como *altura elipsoidal*  $h$ , como se muestra en la siguiente figura:

Normalmente, esta altura no es demasiado utilizada, sino que estamos más acostumbrados a oír hablar de la altura de un punto sobre el nivel medio del mar en algún lugar prefijado. Teniendo en cuenta la definición de geoide, no cabe duda de que esta segunda altura de la que hablamos estará referida a la superficie del mismo (H en la figura anterior), a la que se denomina *altura ortométrica*.

La diferencia entre la *altura elipsoidal* ( $h$ ) y la *altura ortométrica* ( $H$ ) es la que llamamos *altura geoidal* ( $N$ ) u *ondulación del geoide*, pues en realidad representa las desviaciones del geoide con respecto al elipsoide de referencia. Por tanto, las imágenes 5, 6, 7, 8, 9 y 10 están representando alturas geoidales.

La ecuación que liga las tres alturas definidas en la figura, es la siguiente:

$$h = H + N$$

Por tanto, las coordenadas geodésicas de un punto estarán formadas por la longitud y latitud geodésica y, además, la altura del punto sobre el elipsoide de referencia, es decir,  $h$ . Por tanto, tenemos:

*Coordenadas geodésicas del punto P: (lp, jp, hp)*

Por último, se define como *altura topográfica* a la distancia sobre la vertical local (astronómica) desde el punto considerado a la superficie del geoide (igual que la altura ortométrica), pero sin tener en cuenta las variaciones de la fuerza gravitatoria. Es el método usual empleado en Topografía.

El conocimiento de  $h$  no es inmediato, sino que será necesaria la determinación de  $H$  y  $N$ .

A continuación vemos, de una forma muy somera, cómo se efectúan dichas determinaciones:

- 1 Las cotas ortométricas ( $H$ ) se determinan mediante nivelación de alta precisión con respecto a un determinado Dátum altimétrico, el cual define una superficie de cota nula.
- 2 La altura geoidal u ondulación del geoide ( $N$ ), puede determinarse por varios métodos:
- 3 Método de Helmert: se basa en el conocimiento de las coordenadas geodésicas y astronómicas en una serie de puntos (puntos de Laplace), lo cual permitirá calcular las componentes de la desviación de la vertical en los mismos y, por último, de las ondulaciones del geoide por el método de nivelación astrogeodésica.
- 4 Utilización de las anomalías gravimétricas: se aplica la fórmula de Stokes para calcular diferencias de ondulación del geoide entre unos puntos y otros. En combinación con el anterior permite obtener determinaciones de  $N$  con mayor precisión.
- 5 Utilización de observaciones espaciales, del tipo GPS, en puntos en los que se conoce la altura ortométrica ( $H$ ).

En este caso, la resolución es como sigue:

Sean los puntos A y B, en los cuales conocemos  $H_A$  y  $H_B$  y además, por observaciones espaciales, se ha determinado la diferencia  $H_A - H_B$ . Tenemos, por tanto, que:

$$h_A = H_A + N_A$$

$$h_B = H_B + N_B$$

$$h_A - h_B = (H_A + N_A) - (H_B + N_B)$$

De donde:

$$N_A - N_B = (h_A - h_B) - (H_A - H_B)$$

Como hemos dicho,  $(H_A - H_B)$  es conocido; y  $(H_A - H_B)$  se determina mediante nivelación de alta precisión, con lo cual, podemos obtener la diferencia  $(N_A - N_B)$ . De esta manera, calculamos las diferencias de ondulación del geoide entre dos puntos separados entre sí una cierta distancia. Partiendo de un punto en el que la ondulación del geoide sea nula (punto en el que coinciden las superficies del elipsoide y del geoide), podemos determinar el resto de alturas geoidales necesarias y, por lo tanto, las alturas de dichos puntos sobre el elipsoide ( $h$ ).

## 2.4.- DÁTUM GEODÉSICO

### CONCEPTO DE DATUM GEODESICO.

Modelo matemático diseñado para ajustarse lo mejor posible a una parte o a la totalidad del geoide. Se define por un elipsoide y la relación que existe entre éste y un punto sobre la superficie topográfica, establecido como el origen el datum.

Dicha relación se establece por medio de seis cantidades, generalmente (aunque no necesariamente): la latitud y longitud geodésica y la altura de origen, los dos componentes de la deflexión de la vertical en el origen y el acimut geodésico de una línea que va desde el origen hacia cualquier otro punto.

También se puede mencionar que es el punto inicial o datum de coordenadas conocidas del cual se pueda partir, así como una línea de dirección también conocida. Es lo mismo que tradicionalmente se necesita en cualquier levantamiento topográfico, con la diferencia de que en éste las coordenadas pueden ser arbitrariamente establecidas y en el sistema geográfico debe ser bastante absolutas y de aplicación a escala mundial. Esto conduce al concepto de Datum Horizontal.

El datum geodésico está constituido por:

- Una superficie de referencia con definición geométrica exacta, generalmente una elipsoide de revolución.
- Un punto fundamental, en el que coinciden las verticales al geoide y al elipsoide (con lo que también coincidirán las coordenadas astronómicas y geodésicas).

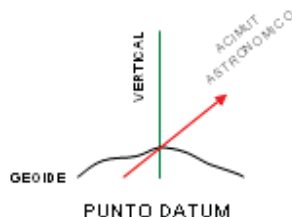
En general, el datum es la superficie de referencia para el cálculo y determinación de coordenadas, estableciéndose unos datos iniciales de los cuales se derivan el resto. En Geodesia se emplean dos tipos de datum, el vertical y el horizontal.

El datum geodésico también cuenta con las siguientes particularidades:

- Conjunto de cantidades que sirven como base para el cálculo de otras cantidades.
- Las coordenadas que surgen de un ajuste de las mediciones (terrestres) comprenden el datum.
- El elipsoide es utilizado como superficie de referencia para referir las coordenadas.
- Existen datums verticales y horizontales.

### 2.4.1.- DÁTUM HORIZONTAL.

El datum horizontal permite la determinación de la longitud y latitud. Se elige un punto en el cual la superficies del elipsoide de referencia y del geoide sean tangentes. De esta forma, ambas verticales (geodésica y astronómica respectivamente) coincidirán, así como las coordenadas astronómicas y geodésicas en dicho punto. Este punto en el cual son tangentes la superficie del geoide y del elipsoide se denomina también Punto Astronómico Fundamental (ya que se determinan sus coordenadas por métodos astronómicos y se igualan a las respectivas geodésicas, pues ambas, como hemos indicado son coincidentes) y es el que sirve como referencia para el posterior cálculo de las coordenadas de todos los vértices de una red geodésica. Es obvio que en el mismo, la desviación de la vertical es nula.



Por lo que se dijo anteriormente, Dátum quiere decir “dato” u “origen” de un sistema de medición, punto de partida. Cuando se sintieron las necesidades geodésicas y cartográficas en los Estados Unidos de Norteamérica se llevaron al cabo una serie de determinaciones astronómicas de alta precisión sobre la latitud, longitud y acimut en un punto situado en el centro geográfico aproximado del territorio norteamericano. Esto es en el estado de Kansas, en un sitio llamado Meades Ranch y durante mucho tiempo ha sido el origen de las coordenadas geográficas de la mayor parte del continente americano.

El dátum geodésico también cuenta con las siguientes particularidades:

- Necesidad de orientar el elipsoide respecto a la superficie física de la Tierra.
- Parámetros:
  1. las dimensiones del elipsoide (a, b)
  2. las coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura episódica) de un punto fundamental,
  3. el acimut de una línea desde este punto a otro
  4. la desviación de la vertical o ángulo entre la perpendicular al geoide (coincidente con la dirección de la gravedad) y la perpendicular al elipsoide.
- Multiplicidad de dátums en la geodesia clásica.
- Ajustes locales de un elipsoide al geoide.

### DÁTUM HORIZONTAL UTILIZADO EN MÉXICO.

Desde este punto, designado como Dátum Norteamericano de 1927 se generó la red de apoyo geodésico primario mediante triangulaciones y levantamientos geodésicos en general que se extendieron en todas direcciones, por el norte hasta Alaska, pasando por Canadá, y por el sur internándose en México, América Central y las antillas conformando así un sistema único en el que se apoyó la cartografía de todas estas áreas geográficas.

De este modo, el dátum horizontal de referencia, hasta hace poco, ha sido el dátum Norteamericano de 1927, abreviado NAD27. Es el dátum el cual se encuentra ligado toda la cartografía nacional producida por el INEGI y DGG en lo que respecta a valores de latitud, longitud y acimut.

Para generalizar, existen y pueden existir otros datos como el resultado de determinaciones astronómicas precisas, en lo que las coordenadas astronómicas obtenidas se hacen iguales arbitrariamente a las coordenadas geodésicas. Sucede sin embargo, que si se trata de ligar un dátum con otro no será posible sin tener en consideración ciertos efectos físicos dinámicos, y de hecho se llegará al cierre con un error no atribuible a causas instrumentales, errores de medición o circunstancias ambientales.

Con el pasar del tiempo se llegó a percibir que el desarrollo de los levantamientos con base en el NAD27 estaban acusando ciertas inconsistencias y distorsiones aleatorias no explicadas y que la

extensión de los mismos señalaba la presencia de errores y deterioro de la precisión esperada, en lo que se señalaron causas tales como el efecto acumulativo de los errores con la distancia, densidad no uniforme de los cubrimientos, las inconsistencias generadas por la aplicación de instrumentos, metodologías y normas no uniformes en los levantamientos o la no rígida aplicación de las mismas, el hecho de que el sistema de referencia estaba definido geométricamente, era solamente bidimensional y no consideraba los efectos dinámicos, además de la presencia de defectos en la aplicación de correcciones a las observaciones, y otras causas. Todo esto dio lugar a una redefinición del NAD27, materializada en lo que ahora se conoce como NAD83, nuevo datum que ya se está aplicando en los Estados Unidos, Canadá y algunos otros países.

El NAD83 es el resultado de un masivo esfuerzo por reducir las inconsistencias del NAD27 a través de un reajuste o compensación matemática de todos los datos disponibles levantados a lo largo del tiempo.

En el caso de México, no se está aplicando el NAD83. Las razones de esto estriban en que el datum continua definido en forma puramente geométrica bidimensional y que el proceso de generación y aplicación del reajuste no se tomaron mayormente en cuenta los datos mexicanos, por lo que los parámetros de transformación tienen más bien un carácter extrapolatorio en el que no se puede confiar, ya que así persisten las distorsiones inherentes al NAD27. Hay que considerar por otra parte, que las necesidades de información muy precisas son ahora más demandantes que en épocas anteriores, por lo que los sistemas de referencia geográfica deben ser correspondientemente muy confiables.

Con el advenimiento de los sistemas satelitales para posicionamiento geodésico se entró de lleno en el campo de la geodesia física, pues estos han hecho posible definir los sistemas de referencia en una forma dinámica y universal, con la tendencia a tener un solo sistema a nivel mundial. De este modo, la definición del sistema de referencia se hace más generalizada y universal. Por otra parte, los sistemas de medición tradicionales están siendo sustituidos por otros apoyados en la recepción de señales de satélite, en particular la instrumentación asociada al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), cuya precisión permite la determinación de posiciones absolutas con errores de unos cuantos centímetros.

Sobre estas consideraciones, el INEGI – DGG ha tomado la decisión de adecuar un nuevo Sistema de referencia, el denominado ITRF92 (Internacional Earth Rotation Service Terrestrial Reference Frame of 1992), época 1988.0. El sistema es global, tridimensional, dinámicamente definido y de muy alta precisión, tiene su origen en los estudios y trabajos de IERS (Internacional Earth Rotation Service), con base en la combinación de varias soluciones globales tridimensionales y se propuso como patrón al cual referir todos los trabajos geodésicos. Este sistema ha dado lugar a la creación de la nueva red geodésica nacional denominada Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), constituida por 14 estaciones fijas distribuidas en todo el territorio nacional, equipadas con instrumental GPS y las cuales están constantemente monitoreando el paso de los satélites de la constelación GPS-Navstar y además constituyen la base de apoyo para los levantamientos geodésicos GPS que se efectúan en el ámbito del territorio nacional.

Conforme a estos criterios, hay un cambio en el concepto de datum, que en esta forma deja de ser un punto, para definirse en términos de una especificación relativa al marco de referencia y a la

definición del conjunto de coordenadas tridimensionales pertenecientes a puntos físicamente establecidos en el terreno.

El hecho de que el nuevo marco de referencia se asocie a una determinada época se debe a que habiendo sido definido dinámicamente, está cambiando constantemente en respuesta a diversos efectos geofísicos; las estaciones de la RGNA monitorean estos cambios, los que por otra parte son relativamente pequeños para tener mayores efectos en la cartografía.

Sin embargo, el cambio de sistema de referencia sí tiene implicaciones cartográficas, pues un punto cualquiera que anteriormente tenía ciertas coordenadas en el NAD27, ahora tendrá un tanto diferentes en el nuevo sistema. De hecho, estas diferencias son tales que en términos de coordenadas UTM se tienen hasta diferencias de hasta unos 60 metros en la dirección este-oeste y de alrededor de unos 200 metros en la dirección norte-sur. Lo que se está haciendo al momento es señalar en las cartas el valor de las correcciones aplicables a las coordenadas geográficas y mostrar en las mismas una doble cuadrícula UTM, una para el NAD27 y otra para el ITRF92. Esto se hará durante algún tiempo, hasta que se abandone definitivamente el NAD27. Aunque realmente ya en esta década del 2000 se viene implementando definitivamente el ITRF92 época 1988.0, incluso se está haciendo la migración al ITRF00 época 2004, pero todavía no se abandona del todo el ITRF92.

#### **DIFERENCIAS ENTRE ITRF92 y NAD27**

De acuerdo a las modificaciones a las normas sobre levantamientos geodésicos en 1998 nuestro actual marco de referencia es el ITRF92.

El NAD27 es un datum antiguo que en su tiempo resolvió las necesidades de Geodesia y cartografía.

Los ITRF son sistemas que ubican el centro de sus ejes de referencia en el geocentro de la masa de la tierra y el NAD27 no.

El ubicar un mismo punto en NAD27 e ITRF92 si difiere en una distancia “considerable” para ciertas escalas.

Los desplazamientos que se presenta cuando se tiene información en diferentes Datum no es constante y va variando aunque pudiera no ser tan significativo en zonas de poca extensión. Esta variación como no es uniforme obliga a calcular parámetros de transformación por zonas, donde el desplazamiento es más o menos similar. La diferencia entre ambos sistemas es de aproximadamente 200mts

#### **2.4.2.- DATUM VERTICAL (NIVEL MEDIO DEL MAR)**

##### **DEFINICION.**

El datum vertical se refiere a la superficie a la cual se refieren las elevaciones. Actualmente la superficie adoptada como datum vertical es el nivel medio del mar (N.M.M). Para su determinación precisa se realizaron observaciones continuas de las fluctuaciones de las mareas en estaciones mareográficas.

Otra definición que tenemos del datum vertical es que es la superficie de referencia que permite el cálculo de las alturas y por tanto es la superficie de altura nula. Lo más usual es que esta superficie sea el geoide y las alturas a las referidas sean alturas ortométricas.

En lo que respecta a las alturas, todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido al nivel de referencia vertical definido por el Datum Vertical Norteamericano de 1988 (NAVD88), debiéndose expresar sus valores en metros.

Es importante señalar que las determinaciones altimétricas clásicas son referidas al geoide, mientras que la moderna utilización del sistema WGS-84 implica que éstas son referidas al elipsoide.

El dátum vertical cuenta con las siguientes particularidades:

- El horizonte de los instrumentos ópticos es sensible al vector gravedad (la superficie debe tener un significado físico).
- La geodesia adopta el geoide (altura = 0) como superficie de referencia para definir las cotas.
- El geoide es materializado a través de lecturas promediadas en un período extendido de tiempo sobre mareógrafos.
- Las alturas sobre el nivel medio del mar (n.m.m.) son materializadas en una serie de puntos fijos que conforman la *Red de Geodésica Vertical Nacional*.

### NIVEL MEDIO DEL MAR

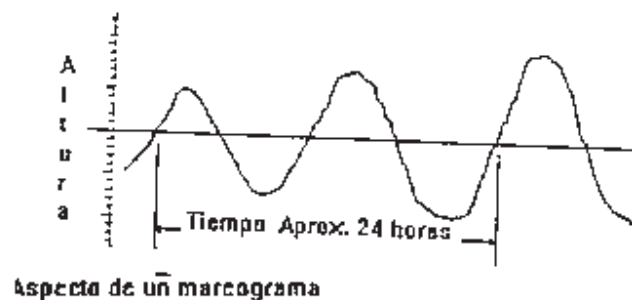
Así como en el plano horizontal se ha tenido un dátum para coordenadas y direcciones, para la medida de alturas o elevaciones se tiene un dátum vertical, pero ahora en un plano o nivel de referencia que para el caso de la mayoría de los sistemas cartográficos se define como el Nivel Medio del Mar. El nivel medio del mar nos permite aproximarnos al geoide. Los efectos oceanográficos producen diferencias en su determinación, que en el peor de los casos pueden exceder al metro pero que generalmente son menores.

El nivel medio del mar se define como la media aritmética de alturas horarias de marea (o alturas equiespaciadas con un intervalo menor) durante un período de tiempo o adecuado que permite eliminar el aporte de la marea, fenómeno resultante de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúan sobre la Tierra. Por lo tanto, se deben realizar largas series de mediciones de marea para poder determinar el nivel medio del mar con precisión.

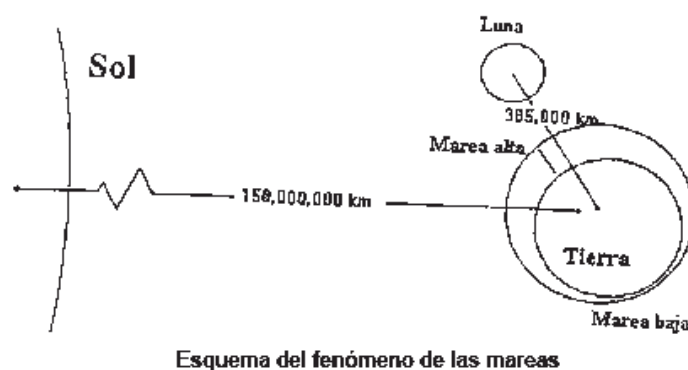
Las primeras mediciones de marea se realizaban con reglas que se disponían sobre la playa y se vinculaban altimétricamente, mediante una nivelación geométrica, a puntos fijos en tierra. Con la aparición de los primeros mareógrafos a flotador se pudo disponer de mediciones continuas y prolongadas en el tiempo, donde la precisión alcanzada es de  $\pm 1$  cm. En altura y  $\pm 1$  minuto en tiempo. También se puede medir el nivel del mar por medio de satélites altimétricos como el GEOSAT y el TOPEX/POSEIDON.

Desde el punto de vista del método de obtención para satisfacer propósitos geodésicos, se define el Nivel Medio del Mar como el promedio aritmético de las alturas horarias de la marea, obtenido por el registro de un mareógrafo estándar a lo largo de un período de aproximadamente 19 años (período de *Saros*).

Nótese en primera instancia que se trata de un promedio aritmético; en segundo, los valores por promediar se obtienen mediante el registro continuo de un aparato llamado *mareógrafo estándar*, el cual es un graficador que registra las alturas de la marea, diseñado para tal efecto, de ahí lo de “estándar”. Con este instrumento se obtiene un gráfico diario de dichas alturas al cual se le llama *mareograma* o *marigrama*, ver siguiente figura:



La tercera característica en la definición es el período necesario para obtener el valor requerido con una precisión que satisfaga propósitos de investigación geodésica. Esto se debe a que la marea es un fenómeno físico que obedece a las leyes de atracción universal de Newton y depende así de las posiciones relativas de la Tierra, el Sol y la Luna en un momento dado. La configuración indicada en la siguiente figura produce una marea marina de una altura específica. Al día siguiente por ejemplo, las posiciones relativas ya no son las mismas, el efecto es distinto en magnitud y por lo tanto la altura de la marea en el mismo sitio será diferente.



Finalmente, y como dato complementario, así como hay mareas marinas, también las hay terrestres, debido a que no siendo la Tierra un cuerpo rígido, también está sujeta a los efectos dinámicos de la atracción del Sol y la Luna, aún cuando las amplitudes de las mareas terrestres son mucho menores que las marinas.

---

**TABLA DE DÁTUMS USADOS EN LA GEODESIA CON SU RESPECTIVO ELIPSOIDE**

| <b>Nombre del Dátum</b>       | <b>Elipsoide de referencia</b> |
|-------------------------------|--------------------------------|
| Adindan                       | Clarke 1880                    |
| Afgooye                       | Krassovsky 1940                |
| Ain el Abd 1970               | International 1924             |
| American Samoa 1962           | Clarke 1866                    |
| Anna 1 Astro 1965             | Australian National            |
| Antigua Island Astro 1943     | Clarke 1880                    |
| Arc 1950                      | Clarke 1880                    |
| Arc 1960                      | Clarke 1880                    |
| Ascension Island 1958         | International 1924             |
| Astro Beacon E 1945           | International 1924             |
| Astro DOS 71/4                | International 1924             |
| Astro Tern Island (FRIG) 1961 | International 1924             |
| Astronomical Station 1952     | International 1924             |
| Australian Geodetic 1966      | Australian National            |
| Australian Geodetic 1984      | Australian National            |
| Ayabelle Lighthouse           | Clarke 1880                    |
| Bellevue (IGN)                | International 1924             |
| Bermuda 1957                  | Clarke 1866                    |
| Bissau                        | International 1924             |
| Bogota Observatory            | International 1924             |
| Bukit Rimpah                  | Bessel 1841                    |
| Camp Area Astro               | International 1924             |
| Campo Inchauspe               | Internacional 1924             |
| Canton Astro 1966             | Internacional 1924             |
| Cape                          | Clarke 1880                    |
| Cape Canaveral                | Clarke 1866                    |
| Carthage                      | Clark 1880                     |
| Chatham Island Astro 1971     | International 1924             |
| Chua Astro                    | Internacional 1924             |
| Corrego Alegre                | Internacional 1924             |
| Dabola                        | Clarke 1880                    |
| Deception Island              | Clarke 1880                    |
| Djakarta (Batavia)            | Bessel 1841                    |
| DOS 1968                      | Internacional 1924             |
| Easter Island 1967            | International 1924             |
| European 1950 (ED-50)         | International 1924             |
| European 1979 (ED-79)         | International 1924             |
| Fort Thomas 1955              | Clarke 1880                    |
| Gan 1970                      | International 1924             |
| Geodetic Datum 1949           | International 1924             |
| Graciosa Base SW 1948         | International 1924             |
| Guam 1963                     | Clarke 1866                    |

|                                     |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Gunung Segara                       | Bessel 1841                       |
| GUX 1 Astro                         | International 1924                |
| Herat North                         | International 1924                |
| Hjorsey 1955                        | International 1924                |
| Hong Kong 1963                      | International 1924                |
| Hu-Tzu-Shan                         | International 1924                |
| Indian 1954                         | Everest (India 1830)              |
| Indian 1960                         | Everest (India 1830)              |
| Indian 1975                         | Everest (India 1830)              |
| Indonesian 1974                     | Indonesian 1974                   |
| Ireland 1965                        | Modified Airy                     |
| ISTS 061 Astro 1968                 | International 1924                |
| ISTS 073 Astro 1969                 | International 1924                |
| Johnston Island 1961                | International 1924                |
| Kandawala                           | Everest (India 1830)              |
| Kerguelen Island 1949               | International 1924                |
| Kertau 1948                         | Everest (Malay. & Singapore 1948) |
| Kusaie Astro 1951                   | International 1924                |
| L. C. 5 Astro 1961                  | Clarke 1866                       |
| Leigon                              | Clarke 1880                       |
| Liberia 1964                        | Clarke 1880                       |
| Luzon                               | Clarke 1866                       |
| Mahe 1971                           | Clarke 1880                       |
| Massawa                             | Bessel 1841                       |
| Merchich                            | Clarke 1880                       |
| Midway Astro 1961                   | International 1924                |
| Minna                               | Clarke 1880                       |
| Montserrat Island Astro 1958        | Clarke 1880                       |
| M'Poraloko                          | Clarke 1880                       |
| Nahrwan                             | Clarke 1880                       |
| Naparima BWI                        | International 1924                |
| <b>North American 1927 (NAD 27)</b> | <b>Clarke 1866</b>                |
| <b>North American 1983 (NAD 83)</b> | <b>GRS 80</b>                     |
| North Sahara 1959                   | Clarke 1880                       |
| Observatorio Meteorologico 1939     | International 1924                |
| Old Egyptian 1907                   | Helmert 1906                      |
| Old Hawaiian                        | Clarke 1866                       |
| Oman                                | Clarke 1880                       |
| Ordnance Survey Great Britain 1936  | Airy 1830                         |
| Pico de las Nieves                  | Internacional 1924                |
| Pitcairn Astro 1967                 | International 1924                |
| Point 58                            | Clarke 1880                       |
| Pointe Noire 1948                   | Clarke 1880                       |
| Porto Santo 1936                    | International 1924                |
| Provisional South American 1956     | International 1924                |

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Provisional South Chilean 1963 | Internacional 1924      |
| Puerto Rico                    | Clarke 1866             |
| Pulkovo 1942                   | Krassovsky 1940         |
| Qatar National                 | International 1924      |
| Qornoq                         | International 1924      |
| Reunion                        | International 1924      |
| Rome 1940                      | International 1924      |
| S-42 (Pulkovo 1942)            | Krassovsky 1940         |
| Santo (DOS) 1965               | Internacional 1924      |
| Sao Braz                       | Internacional 1924      |
| Sapper Hill 1943               | International 1924      |
| Schwarzeck                     | Bessel 1841 (Namibia)   |
| Selvagem Grande 1938           | International 1924      |
| S-JTSK                         | Bessel 1841             |
| South American 1969            | South American 1969     |
| South Asia                     | Modified Fischer 1960   |
| Tananarive Observatory 1925    | International 1924      |
| Timbalai 1948                  | Everest (Sabah Sarawak) |
| Tokyo                          | Bessel 1841             |
| Tristan Astro 1968             | International 1924      |
| Viti Levu 1916                 | Clarke 1880             |
| Voirol 1960                    | Clarke 1880             |
| Wake Island Astro 1952         | International 1924      |
| Wake-Eniwetok 1960             | Hough 1960              |
| WGS 1972                       | WGS 72                  |
| <b>WGS 1984</b>                | <b>WGS 84</b>           |
| Yacare                         | International 1924      |
| Zanderij                       | Internacional 1924      |

## CAPITULO 3.- SISTEMAS GEODESICOS DE REFERENCIA.

### 3.1.- SISTEMA GEODÉSICO DE REFERENCIA.

Los sistemas geodésicos de referencia definen la forma y dimensión de la Tierra, así como el origen y orientación de los sistemas de coordenadas. Los sistemas de referencia geodésicos pueden ser descritos en base a dos modelos matemáticos: el esférico y el elipsoidal, los cuales son obtenidos en base parámetros físicos medidos sobre la superficie terrestre, tales como la aceleración de gravedad.

Los sistemas globales de coordenadas nos permiten definir posiciones sobre la superficie de la Tierra. El más comúnmente usado sistema es el de la latitud, longitud y altura. El primer meridiano y el ecuador son los planos que definen la latitud y la longitud.

- *La latitud geodésica* de un punto, es el ángulo desde el plano ecuatorial a la dirección vertical de la línea normal al elipsoide de referencia.

- *La longitud geodésica* de un punto es el ángulo que forma el meridiano que pasa por el punto con el meridiano origen en sentido dextrógiro.
- *La altura elipsoidal* de un punto es la distancia desde el elipsoide de referencia al punto en dirección normal al elipsoide.

Dentro de un sistema cartesiano global las coordenadas están expresadas en función de los ejes X, Y y Z, del cual su origen es el centro de masas de la Tierra. El eje Z es paralelo al eje de rotación terrestre, el eje X a su vez es paralelo al meridiano de Greenwich y por último el eje Y es perpendicular al plano XOZ.

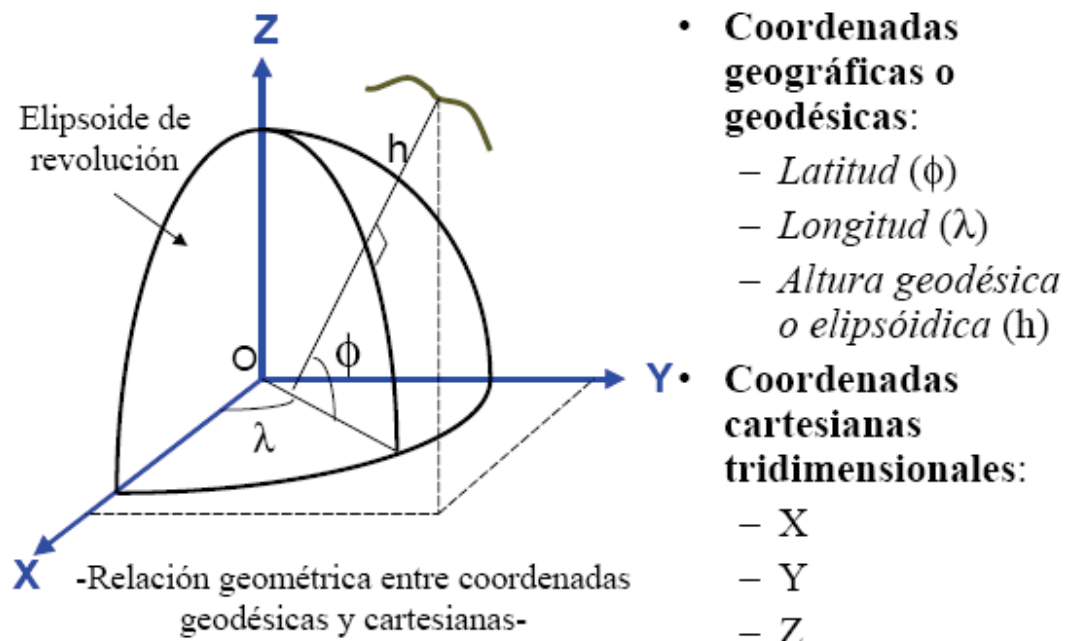
### ¿QUÉ ES UN SISTEMA DE REFERENCIA?

Ya quedo establecido que cuando hablamos de coordenadas geográficas de puntos del terreno, lo hacemos en un determinado Sistema de Referencia. Pero cabe una pregunta: ¿Qué es un Sistema de Referencia? La respuesta es: una terna de ejes cartesianos ortogonales X Y Z, cuyo origen 0 se encuentra ubicado en el centro geométrico del elipsoide de representación matemática de la Tierra. No debemos confundir X e Y cartesiana ortogonal con x e y planas. Las primeras son cartesianas ortogonales y se encuentran en un Sistema de Referencia y las segundas son planas y se encuentran en un Sistema de Representación Cartográfica.

Como sabemos, la Tierra se encuentra ligeramente achatada en los Polos y ligeramente ensanchada en el Ecuador y la forma matemática que mejor la representa es la del elipsoide de revolución.

Si conocemos el valor del semieje mayor del elipsoide y su achatamiento, podremos definir su forma y dimensiones y hallar el resto de sus parámetros. Si al elipsoide le incorporamos una red de meridianos y paralelos, podremos establecer las relaciones matemáticas entre las coordenadas geográficas elipsoidales y las cartesianas ortogonales, y pasar de unas a otras a través de las mismas.

Así, la Tierra quedará representada por un elipsoide de revolución de determinada forma y dimensiones, y los puntos del terreno estarán referenciados ya sea por coordenadas cartesianas ortogonales XYZ o por coordenadas geográficas elipsoidales  $\varphi$ ,  $\lambda$ , h. En la carta ubicaremos a los mismos por coordenadas planas x e y.



### 3.1.1- SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS EN GEODESIA.

Los sistemas de coordenadas geodésicos han sido de escaso interés para la mayoría de los técnicos hasta la llegada de los modernos sistemas de posicionamiento por satélite, en particular el GPS, del que hablaremos más tarde.

Muchos de los problemas que se presentan hoy día con la utilización de estas nuevas técnicas, es la falta de conocimiento de la verdadera complejidad que presentan los sistemas de coordenadas empleados en Geodesia.

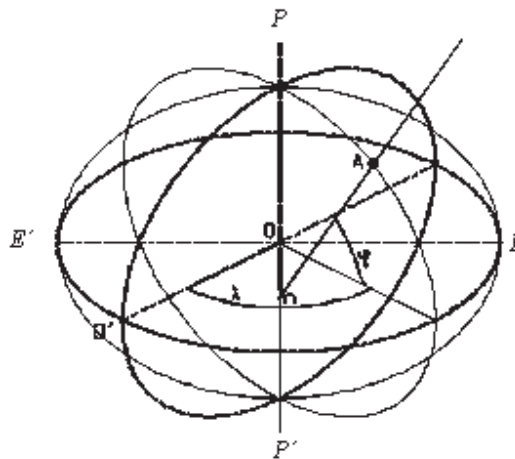
#### 3.1.1.1.- SISTEMAS DE COORDENADAS ASTRONÓMICAS Y GEODÉSICAS

Sea un punto A sobre el elipsoide de referencia (figura siguiente), del cual queremos determinar sus coordenadas geodésicas y astronómicas.

Para ello, vamos a definir los siguientes elementos:

- *Meridiano de origen de longitudes (Greenwich):* PO'P'. El meridiano de origen es un plano arbitrario que contiene al eje de rotación terrestre. En la cartografía española antigua se tomaba el meridiano de Madrid. Actualmente se toma el que pasa por Greenwich, existiendo una diferencia entre ellos de  $3^{\circ} 41' 15''$ .
- *Meridiano que pasa por el punto A:* PAP'
- *Plano ecuatorial:* EO'E'. El Ecuador es un plano perpendicular al eje de rotación de la Tierra, pasando por el centro de gravedad de la misma.
- *Vertical geodésica:* es la normal al elipsoide por el punto A: An.

- *Vertical astronómica*: es la línea, que en dicho punto, toma la plomada, en función del campo gravitatorio, y que será independiente del elipsoide adoptado. Se denomina también *vertical local* o *vertical física*, y es la normal al geoide en el punto considerado.
- *Vertical geocéntrica*: es la línea que pasa por el punto A y el centro del elipsoide (O).



**Longitud y Latitud Geodésicas**

Con estos elementos, podemos definir:

- *Latitud geodésica*: es el ángulo ( $\varphi$ ) formado por la vertical al elipsoide desde el punto A (línea angular, vertical geodésica) y el plano ecuatorial (EO'E'). Se mide en grados sexagesimales, partiendo del Ecuador, siendo positiva al Norte (de 0 a 90°) y negativa al Sur (de 0 a -90°).
- *Longitud geodésica*: es el ángulo ( $\lambda$ ) formado por el plano del meridiano origen (plano PO'P') y el del meridiano que pasa por el punto A (plano PAP'). Se mide en grados sexagesimales, de 0 a 360°, con sentido positivo al Oeste.
- *Latitud astronómica*: es el ángulo (F) formado por la vertical astronómica y el plano ecuatorial. Se define el meridiano astronómico como el plano que pasa por la vertical astronómica en el punto A, y por la línea definida por el eje de rotación terrestre (o una línea paralela a éste).
- *Longitud astronómica*: es el ángulo (L) formado por el plano del meridiano astronómico local y el del meridiano de origen.

Debe quedar claro que las determinaciones geodésicas se realizan sobre la superficie terrestre, aunque para trabajar, como ya dijimos, necesitamos hacerlo sobre la superficie del elipsoide. Recordamos que el conjunto de métodos disponibles para trasladar las determinaciones sobre la superficie real de la Tierra al elipsoide se conoce como *problemas de reducción*.

Para resolver los problemas de reducción es necesario el conocimiento de las desviaciones entre la superficie real terrestre y la del elipsoide de referencia. Para ello tendremos que:

- Determinar la altura de los puntos que están sobre la superficie terrestre
- Medir las desviaciones de la vertical en dichos puntos
- Calcular la fuerza gravitatoria en los puntos indicados, para lo cual suelen utilizarse los gravímetros.

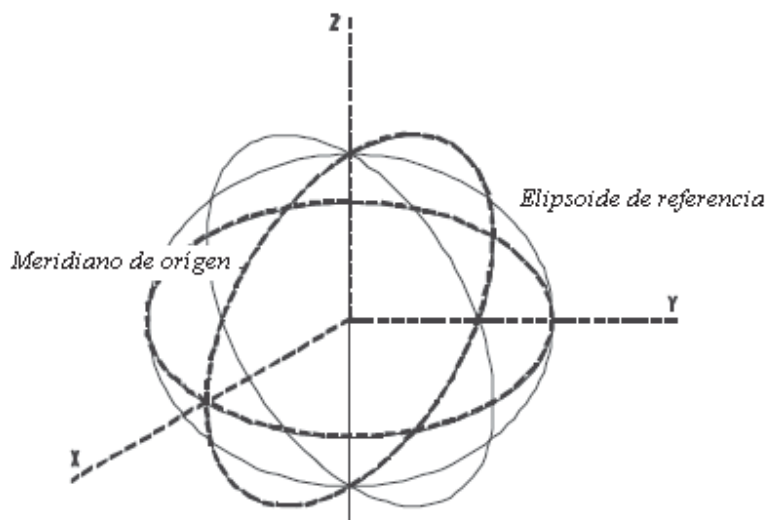
Estas determinaciones entran de lleno en el campo de la Geodesia física, y su cálculo se realiza basándose en la Teoría del potencial gravitatorio, las ecuaciones de Laplace, etc.

Las coordenadas definidas, aunque parezcan relativamente complejas, no son, mas que simplificaciones de un problema todavía más complicado, pues se han despreciado los siguientes efectos:

- El eje de rotación instantáneo no está fijo con respecto a la masa sólida de la Tierra, sino que está afectado de un cierto movimiento, denominado *movimiento polar*. Este efecto fue predicho por Euler en 1765, pero no ha sido determinado con exactitud hasta mucho tiempo después. Como resultado, la posición del Polo Norte (intersección del eje de rotación con la superficie terrestre) puede variar alrededor de 5 a 10 metros cada año. Por esta razón, lo más usual es definir las coordenadas con respecto a un eje medio, internacionalmente admitido, y no con respecto al eje de rotación instantáneo.
- Por otra parte, el meridiano de origen no pasa por un punto en particular de Greenwich, sino que se define como el valor medio de las longitudes adoptadas para una serie de observatorios en todo el mundo. En este sentido, en el año 1988, el *International Earth Rotation Service (IERS)*, cuya sede está en París, definió el eje de rotación medio, el *IERS Reference Pole (IRP)*, Polo Norte de referencia) y el meridiano de origen, denominado el *IERS Reference Meridian (IRM)*.
- Por último, si nos centramos en las coordenadas astronómicas, debemos saber que es posible que las direcciones de la vertical (según el vector gravedad) pueden ser paralelas en dos puntos distintos de la superficie terrestre, lo cual implicaría que ambos tendrían la misma latitud astronómica.

### 3.1.1.2.- SISTEMA DE COORDENADAS RECTANGULARES GEOCÉNTRICAS (X, Y, Z).

Una vez definidos el plano ecuatorial y el meridiano de origen, es posible definir un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) asociado. De esta forma, tenemos un triedro en el que el eje X suele tomar la dirección del meridiano de origen, el eje Z es perpendicular al plano ecuatorial, y el eje Y es perpendicular a los otros dos. El origen de este nuevo sistema de referencia puede ser el centro del elipsoide, o bien el centro de masas terrestre.



### **Coordenadas Rectangulares Geocéntricas**

Con el desarrollo de la Geodesia Cómica, los sistemas de coordenadas espaciales han cobrado una gran importancia. La resolución de los problemas geodésicos con estos sistemas se denomina *Geodesia Tridimensional*.

### **COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

Si tomamos como superficie de referencia la esfera en lugar del elipsoide, hablaríamos de *longitud y latitud geográficas*, con una definición equivalente a las anteriores.

### **COORDENADAS RECTANGULARES PLANAS**

En general, el sistema de coordenadas geográficas es muy adecuado para grandes superficies, pero a menudo su empleo es incómodo, debido principalmente a la complejidad de la geometría esférica en comparación con la geometría plana. Así, empezaron a utilizarse, durante la Primera Guerra Mundial, cuadrículas de coordenadas rectangulares sobre los mapas. Actualmente, el empleo de sistemas de cuadrícula es prácticamente universal.

El sistema de coordenadas geodésicas resulta poco satisfactorio de cara a su utilización práctica en parte porque las unidades de medida son ángulos. Por ello, en la práctica, se suelen emplear sistemas de coordenadas rectangulares planas, que resultan mucho más cómodos de utilizar. Sin embargo, el cambio de un sistema a otro no es fácil, pues la superficie del elipsoide no es desarrollable, es decir, no puede extenderse sobre un plano sin sufrir deformaciones ni rasgaduras. La solución que se ha adoptado es la de representar la superficie del elipsoide sobre un plano según una determinada ley matemática que podría expresarse como sigue:

$$x = f_1(\varphi, \lambda)$$

$$y = f_2(\varphi, \lambda)$$

Donde (x, y) son las coordenadas rectangulares planas deducidas a partir de sus homólogas en el elipsoide ( $\varphi, \lambda$ ), mediante la aplicación de la relación matemática indicada. Existen gran cantidad

de leyes matemáticas que permiten la representación del elipsoide sobre un plano, pero una de las premisas fundamentales es la de obtener la mínima distorsión al proyectar los elementos de una superficie a la otra. Es entonces cuando entramos de lleno en los dominios de la Cartografía y de las proyecciones cartográficas.

En México, el sistema de proyección utilizado es el UTM (el más difundido internacionalmente), en el cual se basa la cartografía de INEGI. Este sistema de proyección será visto en un capítulo posterior de esta tesis.

### **SISTEMA CARTESIANO TERRESTRE (ECEF)**

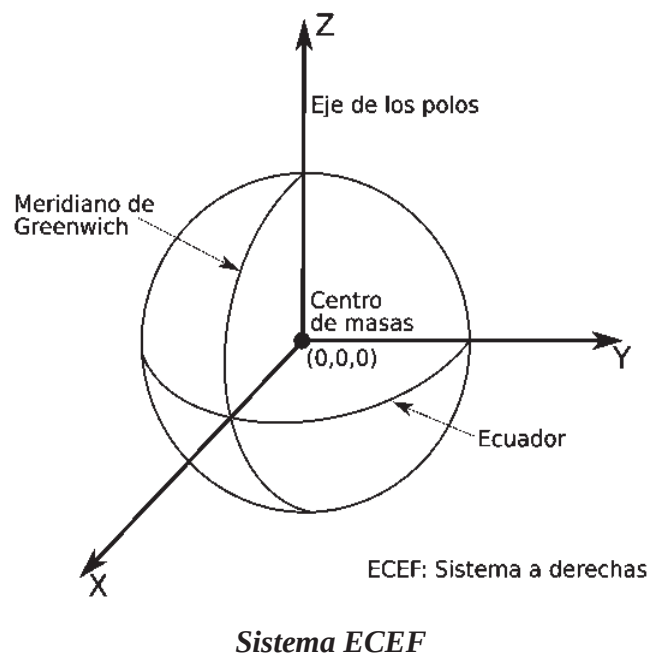
El sistema denominado ECEF es un sistema de coordenadas Cartesiano muy utilizado en GPS que, como su nombre lo indica, está centrado en la Tierra y rota fijado a su superficie. También es llamado CTS.

Las características principales del sistema ECEF son:

- Utiliza coordenadas tridimensionales en los ejes  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$ ,  $\vec{Z}$ , habitualmente expresadas en metros.
- Su centro es el centro de masa de la Tierra.
- El eje  $\vec{Z}$  coincide con el eje de rotación de la Tierra convencional. Como se verá más adelante, el eje de rotación terrestre tiene pequeñas variaciones a lo largo del tiempo con respecto a la superficie de la Tierra (el polo norte geográfico se mueve). Por esa razón, se definió el CIO como la definición estándar para el polo norte.
- El eje  $\vec{X}$  viene dado por la intersección entre el Meridiano de Greenwich y el plano que pasa por el centro de masas de la Tierra y es ortogonal al eje  $\vec{Z}$
- El eje  $\vec{Y}$  está definido por la dirección que es perpendicular a los dos ejes anteriores y su sentido es tal que:

$$\vec{X} \times \vec{Y} = \vec{Z}$$

Es decir,  $\vec{Z}$  es el producto vectorial de  $\vec{X}$  e  $\vec{Y}$ , y el sistema está orientado a derechas



### 3.2.- SISTEMAS DE REFERENCIA

#### 3.2.1.- SISTEMAS DE REFERENCIA CLÁSICOS.

Uno de los problemas clásicos de los geodestas ha sido la determinación de sistemas de referencia sobre los cuales realizar los cálculos de las posiciones tanto planimétricas como altimétricas, con la precisión requerida. Las redes geodésicas nacionales o locales, (X, Y, Z) o latitud, longitud y altura ortométrica están calculadas sobre sistemas de referencia consistente en la definición de:

- Un elipsoide de referencia.
- Un punto fundamental.
- Origen de longitudes
- Origen de latitudes

Los sistemas de referencia clásicos se caracterizan por:

- Tener alcance local o a lo sumo regional.
- Estar realizados en base a técnicas de medición terrestres.
- Estar vinculados al campo de gravedad.
- Contar con redes horizontales y verticales separadas e independientes.

#### 3.2.2.- SISTEMAS GEOCENTRICOS.

Se define como un sistema geocéntrico aquél que especifica una terna de ejes ortogonales cartesianos X, Y, Z centrado en el centro de masas de la tierra. Estos sistemas terrestres (fijados a la Tierra) tienen el eje X solidario al meridiano origen de las longitudes y el eje Z próximo al eje de rotación, por lo tanto este sistema “gira” juntamente con la tierra. Estos sistemas resultan imprescindibles para ubicar puntos ligados al planeta Tierra.

A diferencia de los sistemas geodésicos locales, los sistemas geocéntricos son tridimensionales y de alcance global. El concepto de punto dátum desaparece, y es reemplazado por el origen y orientación de la terna de referencia.

Ejemplos de sistemas geocéntricos terrestres son el WGS84 y el ITRF, que se desarrollarán en otras secciones de esta tesis.

Los sistemas de referencia geocéntricos se caracterizan por:

- Tener alcance global.
- Estar realizados en base a técnicas geodésicas espaciales.
- Ser tridimensionales.

### 3.2.3.- SISTEMAS LOCALES

La geodesia clásica ha resuelto este problema definiendo “sistemas geodésicos locales”, denominación que expresa claramente que su ámbito de aplicación es reducido, no universal.

Un sistema geodésico local queda definido por la elección de un elipsoide de referencia y por un punto origen (dátum) donde se establece su ubicación en relación con la forma física de la tierra (geoide).

Una vez determinada la forma y dimensiones del elipsoide de revolución representativo de la Tierra, debemos ubicarlo en relación a la misma. Podemos hacerlo de manera que el elipsoide de revolución sea tangente al geoide en un punto del terreno.

Anteriormente dijimos que el geoide es la superficie del campo de gravedad terrestre que coincide sensiblemente con el nivel medio del mar. Existen infinitas superficies del campo de gravedad terrestre y la propiedad física que poseen es que la dirección de la plomada en todos sus puntos es perpendicular a los mismos.

Cuando verticalizamos un instrumento en un punto del terreno lo hacemos en dirección a la línea de la plomada que pasa por el mismo (en la dirección de la vertical del lugar). Al atravesar infinitas superficies del campo de gravedad, la dirección de la plomada se va curvando, hasta llegar al geoide. La medida de esa línea curva representa la altura del punto del terreno respecto del geoide.

Por otro lado, podemos trazar la perpendicular al elipsoide que pasa por el punto del terreno, comúnmente denominada normal al elipsoide. Cuando colocamos el elipsoide de revolución tangente al geoide en un punto del terreno, la vertical al geoide será coincidente con la normal al elipsoide en dicho punto. Este punto de tangencia elipsoide-geoide será el origen de las mediciones o punto dátum.

Concretamente, el punto dátum es aquél en el que se hace coincidir la vertical del lugar con la normal al elipsoide (dirección de la vertical nula) y generalmente se establece la condición de tangencia entre el elipsoide y el geoide.

El elipsoide así elegido y posicionado, se adapta bien al geoide en las inmediaciones del punto dátum (siempre que la elección haya sido criteriosa), pero a medida que nos alejamos crece la probabilidad de que esta adaptación aminore. Por esta razón los sistemas así definidos fueron utilizados por países o grupos de países permitiendo llevar adelante todos los proyectos geodésicos en sus respectivos territorios.

Un Sistema de Referencia Local se crea disponiendo de los siguientes tres elementos o parámetros:

a) Coordenadas del Punto Dátum. En dicho punto la normal al elipsoide es coincidente con la vertical del lugar. Estas son sus coordenadas latitud y longitud

b) Elipsoide de Referencia. El mismo queda definido cuando se conocen dos de sus parámetros, en general se utilizan el semieje mayor (a) y el achatamiento (f).  $f = (a-b)/a$

c) Orientación del elipsoide. Se logra estableciendo un azimuth de origen en el punto dátum, a fin de orientar al elipsoide.

En el punto dátum establecido se realiza una observación astronómica de precisión para la determinación de las coordenadas geográficas astronómicas, que serán coincidentes con las coordenadas geográficas elipsoidales pues la vertical del lugar es coincidente a la normal al elipsoide en dicho punto.

La triangulación era el método geodésico utilizado para dar coordenadas geográficas elipsoidales a puntos del terreno materializados, a partir del dátum establecido.

A la hora de superponer cartografía de dos zonas contiguas con dos Sistemas Locales distintos, se producen desplazamientos (corrimientos) en los puntos del terreno comunes a las mismas. Como se puede apreciar, esto se debe a que como los dátums son diferentes, los puntos comunes a ambas zonas (puntos límite) tienen coordenadas geográficas distintas en ambos sistemas locales.

El Sistema de Referencia Local utilizado se adapta bien al geoide en las inmediaciones del punto dátum, pero a medida que nos alejamos del mismo aumenta la probabilidad que esta adaptación disminuya. Por esta razón, el Sistema de Referencia creado es Local, ya que sólo es confiable en las inmediaciones del dátum.

Los sistemas geodésicos locales se materializan mediante las redes de triangulación de diversos órdenes, cuyos vértices se denominan puntos trigonométricos.

Estas triangulaciones se ejecutan en varias etapas:

- Proyecto de las redes.
- Reconocimiento de vértices
- Materialización (monumentación) de los mismos
- Preparación de mediciones
- Ejecución de mediciones angulares, de distancias, y astronómicas
- Cálculo provisorio de coordenadas
- Compensación y asignación de coordenadas definitivas a cada vértice.

El proceso total involucraba la ejecución de numerosas determinaciones astronómicas fundamentales, que sirven para plantear ecuaciones de orientación. Estas estaciones astronómicas se denominan “puntos Laplace”, y las ecuaciones que a partir de ellos se plantean se denominan ecuaciones Laplace.

Entre los problemas que los sistemas geodésicos locales dejan sin resolver podemos destacar dos:

- Al encontrarse dos o más redes basadas en diferentes sistemas (e.j. en zonas limítrofes) resultan diferencias de coordenadas inaceptables,
- Los sistemas locales son únicamente planimétricos, las cotas altimétricas se desarrollan a partir de otros caminos. En otras palabras, no son sistemas tridimensionales.

### 3.2.4.- LOS SISTEMAS DE REFERENCIA MUNDIALES

A partir de los años 60 se han desarrollado un gran número de Sistemas de Referencia Mundiales. Estos Sistemas de Referencia poseen las siguientes características generales:

- Toman como origen de la terna de ejes cartesianos ortogonales al centro de masas de la Tierra.
- Tienen en cuenta el movimiento de los Polos Terrestres y de rotación terrestre, que no pueden ser modelizados. El eje de rotación de la Tierra presenta movimientos (los más significativos son los de Precesión y Nutación) que producen un desplazamiento de los polos terrestres.
- Poseen un conjunto de constantes asociadas y en particular una fórmula de gravedad en el elipsoide de referencia. Desaparece el concepto de punto dátum. Es reemplazado por el origen de la terna de ejes cartesianos ortogonales y su orientación espacial

El Standard Earth 1966 fue el primer Sistema de Referencia Mundial obtenido con la ayuda de satélites artificiales. Fue desarrollado por el Smithsonian Astrophysical Observatory y es el resultado de 100.000 observaciones provenientes de satélites de observación fotográfica; los satélites a flash tipo Anna que emiten una señal luminosa en instantes prefijados y los satélites de tipo Echo y Pageos que son reflectores de la luz solar. Las estaciones de observación estaban equipadas con cámaras fotográficas Baker Nunn.

El Sistema de Referencia NWL - 9D, fue utilizado en la época de los 70's.

Los Sistemas de Referencia WGS (World Geodetic System - Sistema Geodésico Mundial) fueron desarrollados por la DMA (Defense Mapping Agency - Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos) para apoyo de su cartografía.

Los antecesores del Sistema de Referencia Mundial WGS 84 fueron:

- Sistema de Referencia WGS 60
- Sistema de Referencia WGS 66
- Sistema de Referencia WGS 72

El Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) es un producto del IERS (International Earth Rotation Service - Servicio de Rotación Terrestre Internacional). Dicho organismo comenzó a funcionar a partir del año 1988.

Dicho Sistema posee las siguientes características:

- El origen de coordenadas X Y Z es el centro de masas de la Tierra.
- El eje Z pasa por un polo medio.
- El eje X se encuentra en el plano del Ecuador Terrestre, dirigido al origen de las longitudes (común con el usado tradicionalmente próximo a la localidad de Greenwich).
- El eje Y completa con los ejes anteriores una terna derecha de ejes fijos a la Tierra, está en el Ecuador, a 90° al este el eje X

### 3.3.- SISTEMA INTERNACIONAL TERRESTRE.

Desde principios del siglo veinte han existido organismos internacionales cuya misión estaba íntimamente relacionada con la rotación de la Tierra, y como consecuencia inevitable, con la definición y materialización de un sistema de referencia terrestre respecto del cual se determina la posición variable del eje de rotación.

Así, el International Latitude Service, constituido por cinco estaciones astronómicas ubicadas sobre el paralelo de 39 grados de latitud norte, tenía la responsabilidad de determinar el movimiento del polo de rotación con respecto a la superficie terrestre. Para ello, se definió un polo medio "fijo" a la superficie materializado por las latitudes medias de estas estaciones fundamentales (Origen Convencional Internacional OCI). El advenimiento de nuevos instrumentos astronómicos y el interés de más países en contribuir con sus observaciones dio lugar al nacimiento del International Polar Motion Service que llegó a contar con casi un centenar de estaciones participantes.

El Bureau Internationale de l'Heure, agrupaba también a un importante número de estaciones cuya misión principal era determinar una escala de tiempo uniforme, para lo cual era indispensable definir un origen de las longitudes de las estaciones participantes.

El sistema de ejes materializado por las coordenadas astronómicas medias del conjunto de las estaciones participantes de estos servicios internacionales constituía una referencia adecuada para la medición de la rotación de la Tierra, pero de escasa aplicación práctica para satisfacer otras necesidades.

Estos organismos internacionales a menudo superponían sus responsabilidades. Además, la irrupción de nuevas técnicas para la determinación de la rotación de la Tierra en la década del setenta, consolidadas definitivamente en los ochenta, obligó a una redefinición de responsabilidades.

En este marco se establece el Internacional Earth Rotation Service ( IERS) con una estructura compleja que comienza a funcionar a partir de 1988. Las técnicas observacionales que contribuyen a la materialización de sus productos son las siguientes:

- VLBI: medición de radiofuentes extragalácticas por medio de radiotelescopios.
- SLR: medición de distancias láser a satélites específicos desde telescopios especiales.
- LLR: medición de distancias láser a la Luna desde telescopios especiales.
- GPS: medición de distancias a satélites GPS con receptores específicos.
- DORIS: medición de variación de distancias desde satélites específicos a balizas orbitográficas.

Todas ellas aportan diferentes elementos para la solución de distintos problemas, que son combinados por el IERS para la producción de resultados aplicables a distintas disciplinas.

#### SERVICIO INTERNACIONAL DE ROTACION TERRESTRE (IERS).

El Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia, más conocido como International Earth Rotation Service (o Servicio de Rotación Terrestre) fue establecido en 1987 por la Unión Astronómica Internacional y la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica. De acuerdo con los términos de Referencia, el IERS logra su misión a través de los siguientes componentes:

- Centros Técnicos
- Centros de Producto
- Centros de Combinación

- Coordinación de Análisis
- Oficina Central

La IERS proporciona datos sobre la orientación de la Tierra, sobre el Sistema de Referencia Celestes, y el Sistema Internacional de Referencia Terrestre. Es un organismo que se encarga de mantener también convenios que contengan modelos, normas y técnicas.

### 3.3.1.- SISTEMA DE REFERENCIA CELESTE (ICRS)

En 1998, la UAI adoptó el Sistema de referencia celeste internacional (ICRS) como sistema de referencia fundamental. El ICRS está basado en un conjunto de direcciones a objetos extragalácticos cuyo movimiento propio es indetectable. Los objetos son radiofuentes observadas mediante *interferometría de muy larga base* (VLBI), una técnica de observación que emplea varios radiotelescopios situados en distintos puntos de la Tierra para observar simultáneamente un mismo objeto. La combinación de datos de los distintos radiotelescopios permite obtener una posición muy precisa, como si el objeto hubiera sido observado por un solo radiotelescopio de un diámetro equivalente a la distancia entre los observatorios más alejados. En consecuencia, la VLBI proporciona unas direcciones mucho más exactas que los instrumentos ópticos usados en los catálogos estelares como el FK5.

Las direcciones del ICRS permanecen fijas en el espacio, y no giran con el paso del tiempo (es decir, el ICRS no tiene época estándar asociada). Su origen está en el baricentro del Sistema Solar. A fin de preservar la continuidad con las direcciones del sistema de referencia anterior (FK5), las direcciones fundamentales del ICRS están alineadas con las del FK5, dentro del margen de error de éste.

Para su uso práctico, el conjunto de direcciones a radiofuentes lejanas del ICRS debe poder trasladarse al espectro visible, a las estrellas, y eso pudo hacerse mediante el catálogo Hipparcos. Este catálogo, resultado de las observaciones hechas por el satélite del mismo nombre, fue alineado con el ICRS y el resultado fueron posiciones precisas, referidas al nuevo sistema, de unas 120.000 estrellas. Se dice, por tanto, que el Hipparcos es la realización práctica primaria del ICRS en el espectro visible. Otros catálogos, como el Tycho 2, el UCAC2/3 o el USNO-B1.0 proporcionan posiciones referidas al ICRS para muchas más estrellas, si bien no son tan precisos.

Aunque el catálogo FK5 fue la última realización práctica tradicional de los ejes de un sistema de referencia celeste, posteriormente a la introducción del ICRS se publicó el FK6, una versión corregida del FK5 obtenida mediante la combinación de datos de Hipparcos con observaciones terrestres. Los movimientos propios del FK6 son de gran calidad, si bien al tratarse de sólo unos pocos miles de estrellas la utilidad de este catálogo, por sí solo, es muy limitada.

#### **Sistema de referencia celeste intermedio**

Al expresar posiciones basadas en el ICRS en un sistema de referencia propio geocéntrico, y tras corregir por precesión y nutación, obtenemos el *Sistema de referencia celeste intermedio*. Como se explicó antes, el origen de la ascensión recta en este sistema no es el equinoccio, sino el CIO. Al coexistir dos maneras de expresar una posición propia corregida por precesión y nutación, cuando se proporcionan posiciones se debe especificar si se utiliza el nuevo modelo o bien el clásico. Al consultar efemérides, prestaremos atención al sistema empleado:

- Si se trata de coordenadas *astrométricas*, no hay ambigüedad ya que el sistema de referencia es el ICRS, y la posición es directamente comparable con los nuevos catálogos astronómicos, que están basados en dicho sistema.
- Si nos dan efemérides con posiciones *aparentes*, estamos en el modelo clásico con origen en el equinoccio.
- Si la posición es *intermedia*, está basada en el nuevo origen.

### 3.3.2.- SISTEMA DE REFERENCIA TERRESTRE (ITRS)

Para dar la posición (y, en las aplicaciones que lo requieran, también la velocidad) de un observador terrestre, necesitamos un sistema de referencia que gire con la Tierra. De manera similar a como el sistema celeste ICRS se basa en direcciones a un cierto número de objetos de referencia, el **Sistema de referencia terrestre internacional (ITRS)** es proporcionado por las posiciones y velocidades de numerosas estaciones terrestres. Los ejes de coordenadas del ITRS se definen de forma que el sistema gira con la Tierra, su origen es el centro de masas terrestre, y su eje Z tiene la dirección del polo; los otros ejes toman una orientación establecida por convención. El ITRS se lleva a la práctica mediante observaciones VLBI, telemetría láser de la Luna y satélites artificiales, GPS y DORIS (*Doppler Ranging Integrated on Satellite*, una red de seguimiento que permite establecer con precisión las órbitas de satélites artificiales equipados con un receptor especial). Tanto el ITRS como el ICRS son mantenidos por un organismo llamado *Internacional Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS), que coordina las realizaciones prácticas de ambos.

El acceso universal a las coordenadas terrestres lo proporciona el GPS, cuyo sistema de referencia es el *Sistema Geodésico Mundial de 1984* (WGS84). El WGS84 consiste fundamentalmente en un elipsoide de referencia, con un radio ecuatorial de 6.378.137 metros y un achatamiento aproximado de 1/298,257, más unos determinados ejes de coordenadas. Una curiosa consecuencia de la alineación de los ejes del WGS84 es que los receptores GPS no muestran exactamente una longitud cero en el Observatorio de Greenwich: allí, el punto de longitud cero está situado a poco más de cien metros del meridiano. Actualmente los ejes del WGS84 están alineados, dentro de un cierto margen, con la realización práctica del ITRS, por lo que una posición GPS difiere en unos pocos centímetros del ITRS.

### 3.3.3.- SISTEMAS DE REFERENCIA MODERNOS

#### 3.3.3.1.- SISTEMA ITRF.

La precisión alcanzada en la determinación de coordenadas terrestres obliga a un cambio conceptual: no es posible materializar un sistema terrestre en base a coordenadas fijas, porque a nivel de la precisión centimétrica, ninguna estación ubicada sobre la superficie terrestre puede considerarse fija, todas están animadas de movimientos principalmente debidos a movimientos de las placas tectónicas en las que están asentadas.

En consecuencia, el ITRF está constituido por un conjunto de coordenadas y velocidades de las estaciones que lo materializan. Su continua evolución permite agregar nuevas estaciones cada año y mejorar la precisión general del conjunto. Por esa razón, cada nueva realización lleva indicado el año de su determinación, como también, la época fundamental a la cual se refieren las coordenadas listadas (p. ej. ITRF 93, ó ITRF 94, época 1993.0). Esto quiere decir que ITRF 93 difiere de ITRF 94 porque se ha agregado más información para calcular este último, lo que se traduce en pequeñas variaciones de posiciones y velocidades. En su conjunto, estas diferencias permiten encontrar

parámetros de transformación entre las distintas materializaciones del sistema terrestre internacional.

Cabe mencionar que en la actualidad, estas transformaciones están en niveles milimétricos y por el momento no tienen importancia práctica para aplicaciones geodésicas convencionales. Mucho más importante puede ser el efecto de las velocidades, no obstante, es importante no perder la dimensión del problema: este efecto debe ser considerado cuando se trabaja en redes regionales que involucran distintas placas tectónicas y, de manera especial, cuando se utilizan distintas estaciones con coordenadas ITRF definidas en una época original.

Supóngase que se realiza la medición de una red nacional de muy alta precisión con una época promedio de observación en 1997.5. Se decide procesar el material observacional local junto con las observaciones de un número apropiado de estaciones permanentes GPS distribuidas en todo el mundo. Se toman sus coordenadas y velocidades de ITRF 94 (por ejemplo), por lo que constituyen el marco de referencia gracias al cual la red nacional resulta también expresada en ITRF 94.

Cada estación que materializa al sistema tiene sus coordenadas fijas para una época determinada (por ejemplo, 1993.0):

$X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ \text{ITRF 94 época: 1993.0}$

$dX/dt \ dY/dt \ dZ/dt \ \text{ITRF 94 época: 1993.0}$

y se acompañan las componentes de la velocidad ( $d/dt$ ) para la misma época. Cuando se utilizan las observaciones de esas estaciones de referencia en un momento posterior, por ejemplo 1997.5, se deben utilizar las coordenadas del momento:

$$X = X_0 + (1997.5-1993.0).dX/dt$$

$$Y = Y_0 + (1997.5-1993.0).dY/dt$$

$$Z = Z_0 + (1997.5-1993.0).dZ/dt$$

Las coordenadas que se obtienen están en el mismo sistema ITRF 94, pero en la época 1997.5. La red nacional procesada en este marco resultaría expresada en ITRF 94, época 1997.5.

### 3.3.3.2.- SISTEMA WGS84.

El acrónimo WGS 84 deviene de World Geodetic System 1984 (Sistema geodésico mundial 1984). Se trata de un sistema de referencia creado por la Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América (Defense Mapping Agency - DMA) para sustentar la cartografía producida en dicha institución y las operaciones del Departamento de Defensa (DoD).

Este sistema geodésico estuvo estrechamente ligado al desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) sirviendo durante mucho tiempo para expresar las posiciones tanto de los puntos terrestres como de los satélites integrantes del segmento espacial (a través de las efemérides transmitidas).

Desde el punto de vista militar, WGS 84 es el sistema oficial aprobado por la Junta de Comandantes en Jefe de los Estados Unidos de América para las operaciones militares en todo el mundo. Casi todo el equipamiento militar actual incluyendo sistemas de navegación y armamentos emplean de algún modo este sistema de referencia mundial.

El WGS 84 no es sólo un sistema geocéntrico fijado a la tierra (ECEF) de ejes X, Y, Z sino además un sistema de referencia para la forma de la tierra (elipsoide) y un modelo gravitacional.

El WGS 84 se ha popularizado por el uso intensivo de GPS y se han determinado parámetros de transformación para convertir coordenadas a todos los sistemas geodésicos locales y otros sistemas geocéntricos (ver secciones respectivas).

La DMA llegó a la definición de este sistema después de haber ensayado otros tres anteriores: WGS 60, WGS 66 y WGS 72, este último a partir del sistema Satelitario Transit (Transit Doppler Reference Frame - NSWC 9Z - 2) y muy parecido al actual WGS 84, al punto que para pasar de uno al otro sólo es necesario un corrimiento del origen de coordenadas de 4.5 metros, una rotación alrededor del eje Z de 0.814 segundos de arco y una diferencia de factor de escala de -0.6 ppm.

### DEFINICION

El WGS 84 es un Sistema Convencional Terrestre (CTS) tal que:

- El origen de coordenadas X Y Z es el centro de masas de la Tierra,
- el eje Z pasa por el polo convencional terrestre (CTP) definido por el Bureau Internacional de la Hora (BIH) para la época 1984.0,
- El eje X es la intersección entre el meridiano origen de longitudes definido por el BIH para la época 1984.0 y el plano del ecuador CTP,
- El eje Y completa con los ejes anteriores una terna derecha de ejes fijos a la Tierra, está en el Ecuador, a 90° al este del eje X
- El origen de la terna así definida sirve además de centro geométrico del elipsoide WGS 84, y el eje Z es su eje de revolución,
- El semieje mayor (a) del elipsoide 1984 mide 6378137 metros,
- El achatamiento (a-b)/a siendo b el semieje menor, es 1/298.257223563
- Otros parámetros, además de los anteriores, son:  
 Constante de gravitación terrestre  $GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$   
 Velocidad angular de la tierra  $\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/seg}$   
 Coeficiente gravitacional de segundo grado normalizado  $C20 = -484.16685 \times 10^{-6}$   
 Velocidad de la luz en el vacío  $c = 299792458 \text{ m s}^{-1}$

### RELACION DE WGS 84 CON SISTEMAS INERCIALES Y CON SISTEMAS INSTANTANEOS

La relación matemática entre los sistemas geocéntricos WGS 84 (que es un CTS), CIS (sistema inercial anteriormente materializado por el Catálogo Fundamental de Estrellas FK5 para la época J2000.0, actualmente el CIS se materializó con un conjunto de posiciones de radiofuentes lejanas observables con VLBI) e ITS (sistema instantáneo) es la siguiente:

$$CTS = WGS 84 = [A] [B] [C] [D] \text{ CIS siendo ITS} = [B] [C] [D] \text{ CIS}$$

donde:

[A]= Matriz de rotación por movimiento de los polos

[B]= Matriz de rotación por movimiento de revolución de la Tierra (tiempo sideral)

[C]= Matriz de rotación por nutación

[D]= Matriz de rotación por precesión

### RELACION DE WGS 84 CON OTROS SISTEMAS GEOCÉNTRICOS Y CON SISTEMAS LOCALES.

Probablemente ningún sistema geodésico ha ya sido tan estudiado en relación con todos los demás como el WGS 84.

Un ejemplo de esto es la reciente determinación de los parámetros de transformación con el sistema PZ-90, utilizado por la constelación GLONASS que está siendo integrada actualmente al sistema GPS.

Existe un extenso *software* para transformar WGS 84 a cada uno de los sistemas geodésicos locales y geocéntricos, incluyendo los instantáneos ITRF (Ver sección respectiva)

### **ACTUALIZACION DEL SISTEMA**

El sistema WGS 84 se ha ido desactualizando con el correr de los años. La serie de sistemas ITRF, en cambio, se modifican anualmente y han llegado a un orden de precisión muy superior. (Ver sección respectiva)

Debido a esto, y teniendo en cuenta las mayores demandas del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, se han producido en los últimos años una serie de refinamientos y mejoras en el sistema, de manera de permitir su uso en las aplicaciones de muy alta precisión.

Este esfuerzo dio por resultado un marco de referencia para el WGS84 que es coincidente con ITRF92 dentro de los 10cm. Este marco de referencia mejorado se conoce como WGS 84 (G730).

El único parámetro afectado por esta mejora fue  $GM = 3986004.418 \times 10^8 \text{m}^3\text{s}^{-2}$ . Comparado con el anterior, resulta una diferencia muy pequeña, dentro del error estándar del parámetro.

La mejora no ha tenido ningún efecto sobre el desarrollo de la cartografía. Sin embargo, se estudian otras modificaciones que incluyen nuevas definiciones del geoide, que resultarán en una mayor calidad de cartas y mapas.

### **3.4.-MARCOS DE REFERENCIA.**

Los Marcos de Referencia son las redes de puntos de los Sistemas de Referencia. Los Marcos de Referencia clásicos, tales como los que materializan a los Sistemas de Referencia Locales y Nacionales, son estables ya que las coordenadas de sus puntos permanecen invariables con el transcurrir del tiempo. Son bidimensionales, ya que no se cuenta con alturas elipsoidicas o geodésicas. Las alturas se encuentran referidas al geoide y no se conoce con suficiente precisión el valor de las ondulaciones geoidales para convertirlas a geodésicas. Es por ello que se aconseja la medición GPS en puntos de las líneas de nivelación, con vistas a mejorar el conocimiento de la posición del geoide respecto del elipsoide y de la precisión en la transformación de alturas elipsoidicas a alturas referidas al geoide.

Los Marcos de Referencia modernos, tales como los que materializan a los Sistemas de Referencia Mundiales, son activos ya que las coordenadas de sus puntos varían con el transcurrir del tiempo debido a que los mismos presentan desplazamientos en el terreno producto del movimiento de las placas en que se encuentra fragmentada la corteza terrestre.

La posibilidad que brinda la tecnología satelitaria de determinar la velocidad de desplazamiento de los puntos hace que el marco de referencia se mueva. Son tridimensionales, ya que se dispone de latitud, longitud y altura geodésicas.

### **DIFERENCIAS ENTRE SISTEMAS DE REFERENCIA Y MARCOS DE REFERENCIA.**

Existe alguna confusión en los conceptos de sistemas y marcos de referencia. Los sistemas de referencia son los estudiados en la sección anterior: se definen a partir de consideraciones matemáticas y físicas e involucran la especificación de parámetros, puntos origen, planos, ejes, etc. Los marcos de referencia están constituidos por puntos materializados en el terreno y ubicados con gran exactitud y precisión según alguno de los sistemas de referencia.

En los sistemas geodésicos locales, el marco de referencia estaba dado por los puntos trigonométricos de distintos órdenes que a través de cadenas y mallas cubren los territorios.

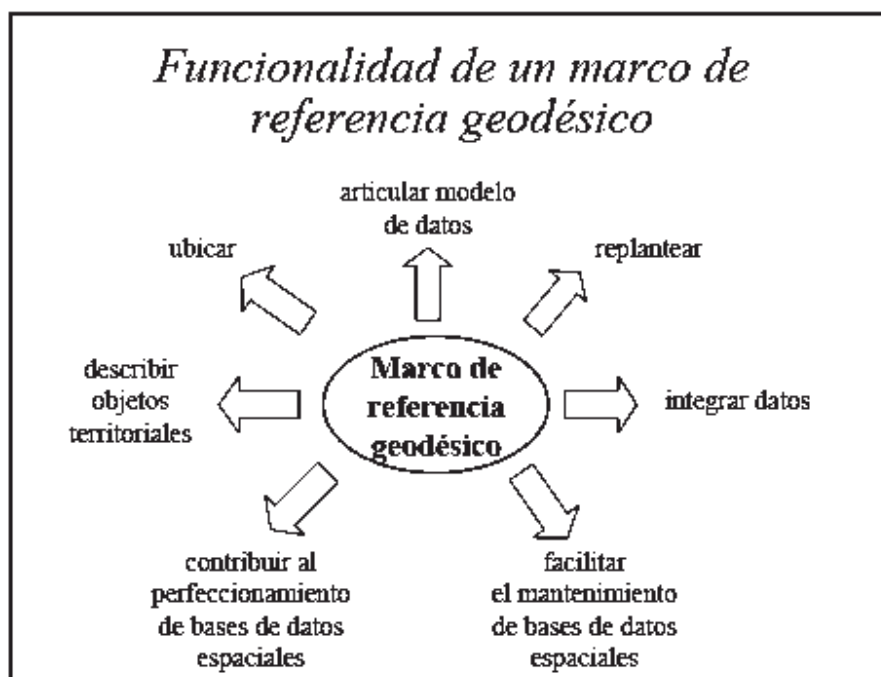
En los sistemas geocéntricos, se llevan adelante redes de puntos medidos usualmente con GPS y vinculados en lo posible a puntos de las redes anteriores, siguiendo una serie de precauciones para minimizar los errores sistemáticos y aleatorios que pueden afectar al conjunto. Un ejemplo de marco de referencia es el ITRF92 que se analiza en otra sección.

En la época en que se escriben estas líneas, en el mundo entero se está produciendo una transición de los sistemas locales a los sistemas geocéntricos. En nuestro país, ello implica el paso del sistema NAD27 al marco de referencia ITRF92 y sistemas WGS84 e ITRF

#### **EL MARCO DE REFERENCIA ITRF.**

El Marco de Referencia ITRF (International Terrestrial Reference Frame - Marco de Referencia Terrestre Internacional), es la Red de puntos que materializan el Sistema ITRS. Consta de aproximadamente 180 puntos uniformemente distribuidos en la Tierra y medidos por distintas técnicas geodésicas, como VLBI (dos puntos terrestres separados miles de kilómetros reciben señales de fuentes distantes como los cuásars, determinándose por interferometría la distancia que los separa), TELEMETRIA LASER (estaciones terrestres emiten señales láser a satélites artificiales o a la Luna, cuya ubicación se conoce con precisión. Los satélites devuelven la señal y se registra el tiempo de ida y vuelta de la misma, determinándose la distancia entre las estaciones terrestres), BALIZAS DORIS (balizas en Tierra emiten señales de radiofrecuencia que permiten el posicionamiento relativo) y GPS.

Todos los años se miden los puntos de la Red ITRF, pudiéndose incorporar más puntos en cada medición anual y mejorar la precisión del conjunto. Surge así el ITRF 92 (medición del año 1992), ITRF 94 (medición del año 1994), etc. Además se debe precisar la época de medición, como por ejemplo 1993.5 (mediados de año de 1993). Si decimos que las coordenadas son ITRF 94 - época 1995.4 significa que hemos tomado la red del año 1994 con coordenadas referidas a la época 1995.4. Para la conversión de la medición a una determinada época, es necesario conocer la magnitud del desplazamiento de los puntos medidos conforme transcurre el tiempo, que se logra a través de las citadas mediciones anuales de la Red ITRF.



### 3.5.- TRANSFORMACION ENTRE SISTEMAS.

La transformación de coordenadas entre sistemas de referencia distintos es un problema que aparece frecuentemente en la Agrimensura y la Geodesia. Antes de abordar el tema, conviene diferenciar las dos etapas que, unidas, conllevan a la solución global del problema:

- a) determinar los parámetros de transformación;
- b) transformar las coordenadas.

Puede ocurrir que la etapa a) no sea necesaria, porque se dispone de parámetros de transformación previamente determinados. Sin embargo, es útil entender conceptualmente los problemas que presenta la determinación de parámetros de transformación, para comprender las limitaciones con que los mismos pueden ser aplicados. Si bien la etapa a) precede a la b), por razones didácticas, la discusión se aborda en el orden inverso.

El propósito de estas es el de transformar coordenadas de un sistema a otro. Se han propuesto diferentes métodos para llevar a cabo las transformaciones. La elección de alguno de ellos dependerá de los resultados requeridos. El procedimiento básico de campo para la determinación de los parámetros de transformación es el mismo, independientemente del método a emplear.

Primero, se debe contar con coordenadas en ambos sistemas de coordenadas (por ejemplo en WGS84 y en el sistema local) para tener por lo menos tres (de preferencia cuatro) puntos comunes. A mayor cantidad de puntos comunes incluidos en la transformación, se tendrá mayor oportunidad de tener redundancia y se podrán verificar los errores.

Se consiguen puntos comunes midiendo los puntos con GPS, donde las coordenadas y las alturas ortométricas sean conocidas en el sistema local. (Por ejemplo, en los puntos de control existentes). De esta forma se pueden calcular los parámetros de transformación, utilizando alguno de los métodos de transformación.

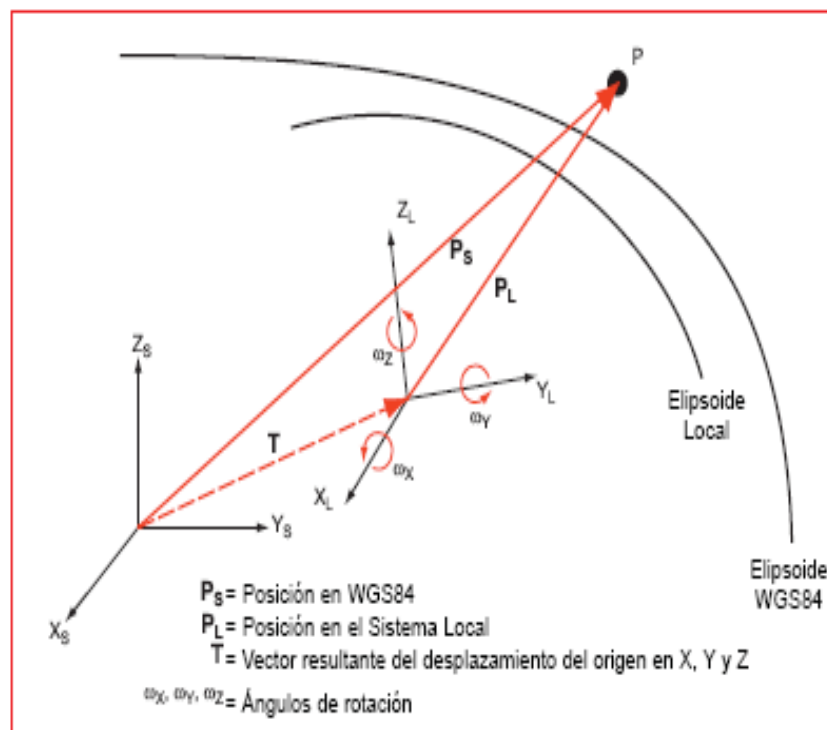
Es importante notar que la transformación sólo se deberá aplicar a los puntos que se encuentren en el área delimitada por los puntos comunes en ambos sistemas. Los puntos fuera de esta área no deberán ser transformados utilizando los parámetros calculados, sino que deberán formar parte de una nueva área de transformación.

### TRANSFORMACION DE HELMERT

La transformación de 7 parámetros de Helmert ofrece una transformación matemáticamente correcta. Esta transformación conserva la precisión de las mediciones GPS y las coordenadas locales. La experiencia ha demostrado que comúnmente, los levantamientos con GPS son medidos con un nivel de precisión mucho más alto que los antiguos levantamientos efectuados con instrumentos ópticos tradicionales. En la gran mayoría de casos, los puntos medidos previamente no serán tan precisos como los puntos medidos con GPS., lo cual puede provocar una falta de homogeneidad en la red.

Al transformar un punto entre diferentes sistemas de coordenadas, lo mejor es tener en cuenta que lo que cambia es el origen desde el cual se derivan las coordenadas y no la superficie sobre la cual se apoyan.

Para transformar una coordenada de un sistema a otro, los orígenes y ejes del elipsoide deben ser conocidos uno con relación al otro. Con esta información, el desplazamiento en el espacio de X, Y y Z desde un origen hasta el otro, puede ser determinado, seguido de una rotación alrededor de los ejes X, Y y Z y cualquier cambio en la escala entre los dos elipsoides.



Transformación de 7 parámetros de Helmert

## OTROS MÉTODOS DE TRANSFORMACIÓN

Mientras que el método de transformación de Helmert es matemáticamente correcto, no toma en cuenta las irregularidades en el sistema de coordenadas locales, y para obtener valores precisos de altura, debe conocerse el valor de la ondulación geoidal.

Debido a esto, Leica también pone a disposición en sus equipos y programas toda una serie de métodos de transformación.

El llamado Método de Interpolación no se basa en el conocimiento del elipsoide local ni de la proyección. Las inconsistencias en las coordenadas locales se tratan estirando o encogiendo las coordenadas GPS para poder encajar de manera homogénea en el sistema local.

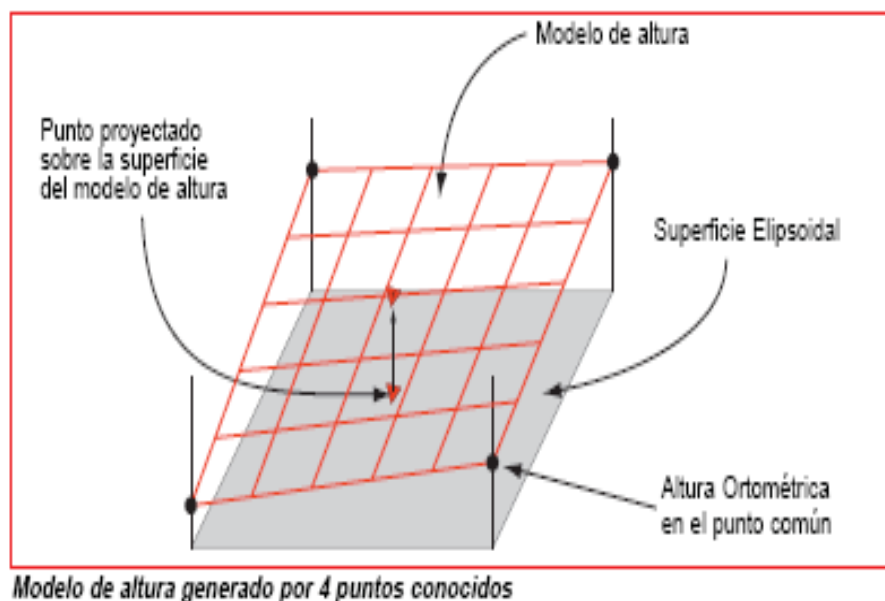
Además, si se tiene disponible suficiente información altimétrica, se puede construir un modelo de alturas. De esta manera se compensa la falta de información de ondulación geoidal, siempre y cuando se cuente con suficientes puntos de control.

Un método alternativo al de Interpolación es el llamado de Un paso, el cual trabaja también con las transformaciones de altura y posición en forma separada.

Para transformar la posición, las coordenadas WGS84 se llevan a una proyección Transversa de Mercator temporal. De esta forma, se calculan los giros, desplazamientos y el factor de escala de la proyección "temporal" a la proyección verdadera. La transformación de la altura es un cálculo de la misma en una sola dimensión. Este tipo de transformación se puede emplear en áreas donde no se conoce el elipsoide local ni la proyección y donde además, el geoide se mantiene razonablemente constante.

Tanto el método de Interpolación como el de Un Paso deben estar limitados a un área de más o menos 15km x 15km (10 x 10 millas).

Una combinación de los métodos de transformación de Helmert e Interpolación se puede encontrar en el método "Stepwise". Este método emplea una transformación de Helmert 2D para obtener la posición y una interpolación de alturas para obtener las alturas. Este método requiere del conocimiento del elipsoide local y de la proyección.



**TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS RECTANGULARES.**

La forma más general de transformar las coordenadas rectangulares es mediante el uso de una transformación de siete parámetros:

- Las tres translaciones entre los orígenes,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ;
- Las tres rotaciones entre los ejes,  $R_X$ ,  $R_Y$ ,  $R_Z$ ;
- La diferencia de escala,  $S$ .

Las expresiones matemáticas pueden encontrarse, por ejemplo, en “Department of Defense World Geodetic System 1984: Its definition and relationships with local geodetic systems”, DMA Technical Report 8350.2, 1987.

Se debe prestar especial atención al signo y las unidades de los parámetros. Los que permiten pasar del sistema A al B tienen igual valor absoluto pero signo opuesto a los que permiten pasar del B al A. Habitualmente las translaciones se dan en metros, las rotaciones en segundos de arco y la escala en partes por millón, pero no son infrecuentes las excepciones.

Puede ocurrir que no se disponga de los siete parámetros sino, por ejemplo, de las tres translaciones solamente. Este es un caso particular de la transformación de siete parámetros, en el que las rotaciones y la diferencia de escala asumen el valor 0. En tal caso, la transformación se reduce simplemente a:

$$X_B = X_A + \Delta x$$

$$Y_B = Y_A + \Delta y$$

$$Z_B = Z_A + \Delta z$$

**COORDENADAS GEODÉSICAS**

Hasta ahora nos hemos referido a las coordenadas rectangulares. Sin embargo, las más frecuentemente usadas en la práctica no son éstas, sino las geodésicas (también reconocidas como geográficas). Dos alternativas son posibles en este caso para realizar la transformación:

Usando una transformación de siete parámetros:

1) Transformar  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  a  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (el sistema de referencia no cambia, continua siendo el A, por lo tanto, en la transformación debe usarse el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide asociado al sistema A).

2) Transformar  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  del sistema A al B mediante la transformación de Siete parámetros.

3) Transformar  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  a  $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$  (el sistema ha cambiado, ahora es el B, por lo tanto debe usarse el semieje mayor y el aplastamiento del elipsoide asociado al sistema B).

Un problema que se presenta frecuentemente es carecer de alturas geodésicas. Si se dispone de alturas sobre el nivel del mar, el inconveniente puede salvarse convirtiéndolas en geodésicas mediante la adición de la ondulación del geoide; de lo contrario, no queda otra posibilidad que asumir un valor aproximado mediante una hoja topográfica. Ambas alternativas introducen errores en la transformación, siendo preferible la primera.

Más detalles sobre el problema altimétrico se verán más adelante. Los errores en la altura tienen un efecto pequeño sobre la latitud y la longitud.

**CONVERSIÓN DE COORDENADAS GEODÉSICAS A CARTESIANAS.**

Si se toma como una figura próxima a la Tierra un elipsoide de revolución, la posición de cualquier punto sobre la superficie terrestre, quedará definida por las coordenadas geodésicas geocéntricas latitud, longitud y altura (esta última será la diferencia entre el elipsoide y la superficie topográfica). El problema que se presenta es encontrar la relación entre estas coordenadas y sus coordenadas cartesianas. Sabiendo que la ecuación del elipsoide de referencia en coordenadas rectangulares es:

$$((X^2 + Y^2) / a^2) + (Z^2 / b^2) = 1$$

Para esta situación se define que el centro del elipsoide coincide con el centro de masa de la Tierra (geocentro) y el eje Z coincide con el eje de revolución del elipsoide. De esta manera se tiene que las coordenadas cartesianas de un punto P sobre el elipsoide en función de las coordenadas geográficas son:

$$X = v * \cos(\varphi) * \cos(\lambda)$$

$$Y = v * \cos(\varphi) * \sin(\lambda)$$

$$Z = v * (1 - e^2) * \sin(\varphi)$$

Luego las coordenadas de un punto P sobre el espacio, normal al elipsoide son:

$$X = (v + h) * \cos(\varphi) * \cos(\lambda)$$

$$Y = (v + h) * \cos(\varphi) * \sin(\lambda)$$

$$Z = (v * (1 - e^2) + h) * \sin(\varphi)$$

En donde:

$$v = \frac{a}{1 - e^2 \sin^2 \varphi}^{1/2}$$

$$e^2 = 2f - f^2$$

$$h = N + H$$

### CONVERSIÓN DE COORDENADAS CARTESIANAS A GEODÉSICAS

Ahora el problema es inverso, por lo cual se debe buscar la relación que existe entre las coordenadas cartesianas y las geodésicas, que nos permitan convertir desde XYZ a latitud, longitud y altura elipsoidal.

El problema se resuelve aplicando las siguientes fórmulas:

| GEODÉSICAS A CARTESIANAS                                                                                                                                                                                 | CARTESIANAS A GEODÉSICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X = (v + h) \cos \phi \cos \lambda$ $Y = (v + h) \cos \phi \sin \lambda$ $Z = ((1 - e^2)v + h) \sin \phi$ <p>En donde:</p> $v = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}}$ $e^2 = 2f - f^2$ $h \cong N + H$ | $\lambda = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$ $\phi = \tan^{-1} \frac{(Z + e^2 a \sin^2 u / (1 - f))}{(p - e^2 \sin^2 u)}$ $h = p \cos \phi + Z \sin \phi - a(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}$ <p>En donde:</p> $p = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ $u = \tan^{-1} \frac{Z(1 - f)}{p} \left[ 1 + \frac{e^2 a}{r(1 - f)} \right]$ $r = (p^2 + Z^2)^{1/2}$ |
| Tabla 6.2                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

### 3.6.- SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO MEXICANO

Según la normas que define el INEGI para el Sistema Geodésico Nacional, se adopta el conceptualizado por la Asociación Internacional de Geodesia a través del Sistema Geodésico de Referencia (GRS80), y éste deberá estar referido al Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) definido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) para el año 2000, con datos de la época 2004.0 denominado ITRF00 época 2004.0 asociado al GRS80, el cual es el Marco de Referencia oficial para México.

### 3.7.- LA GEORREFERENCIACIÓN

Hablar de información espacial nos obliga a conocer algunos aspectos fundamentales de cartografía y geodesia para su correcta posición sobre el globo terráqueo.

La difusión de los SIG y del GPS ha introducido en nuestro lenguaje cotidiano la palabra *georreferenciar*. Esta palabra de apariencia inofensiva encierra en verdad una serie de problemas, algunos de los cuales trataremos de discutir en este tema. En un sentido abstracto, georreferenciar significa asignar *algún tipo de coordenadas ligadas al terreno* a los objetos de interés, sean estos naturales, obras de ingeniería, los vértices de una parcela, etc. No nos proponemos discutir los *distintos tipos de coordenadas* que pueden utilizarse con este propósito (curvilíneas, rectangulares, proyectivas, etc.), sus ventajas o inconvenientes. Es este un tema muy vigente y muy interesante que bien podría ser motivo de otra contribución, pero nuestro objetivo ahora es discutir qué entendemos por *ligadas al terreno*.

Adquirir la información que integrará la base de datos es la operación más laboriosa y costosa involucrada en el desarrollo de un SIG. Georreferenciar dicha base de datos es, por el contrario, una operación sencilla y de bajo costo relativo pero solo si se tienen las nociones básicas para hacerlo. Sin embargo, si se piensa que las coordenadas son el vehículo que permite que distintos usuarios superpongan en el SIG la capa de información de su interés, se advierte que de una georreferenciación correcta depende, en gran medida, el aprovechamiento que pueda hacerse del SIG y multiplica su valor de mercado por cuanto lo hace útil a un mayor número de usuarios.

En la actualidad muchos operarios de los SIG han omitido el tema, y por lo tanto, en cuanto se encuentran con problemas de sobreposición de información no tienen los conocimientos e información necesaria para dar una solución o explicación al problema.

Se parte del hecho de que toda la información espacial está dentro de un sistema de referencia geodésico convencional o “Dátum”, que dan origen a las coordenadas y que ubican un punto en alguna parte del mundo es decir establece el origen de las coordenadas de latitud y longitud.

La expresión *georreferenciación correcta* involucra varias condiciones, por ejemplo, que los procedimientos de medición y cálculo en base a los que se obtienen las coordenadas de los puntos de apoyo del levantamiento cumplan con ciertos estándares pre establecidos. Pero la condición más relevante y sine qua non es que dichas coordenadas estén vinculadas al mismo sistema de referencia. Y en este contexto la palabra “mismo” no reconoce fronteras: debe ser el mismo sistema de referencia en Aguascalientes, Nuevo León, Chiapas o Michoacán. Debe ser el mismo sistema de referencia en Canadá, Estados Unidos o México.

La topografía es la ciencia que permite representar una parte de la superficie terrestre en un documento denominado carta topográfica, confeccionado a una determinada escala y equidistancia de acuerdo a las necesidades técnicas a satisfacer. Entendiendo por documento a todo aquello que da fe de algo, la carta es un documento pues da fe de la forma del terreno y de la ubicación planimétrica y altimétrica de todos y cada uno de los elementos del terreno representados en ella.

Un detalle del terreno de coordenadas geográficas conocidas, se encontrará representado en la carta topográfica a través de un símbolo cartográfico y ubicado en la misma por medio de coordenadas planas.

Esta correspondencia biunívoca entre coordenadas geográficas en el terreno y coordenadas planas en la carta, constituye un Sistema de Representación Cartográfica. Esto significa que a cada punto del terreno de coordenadas geográficas latitud  $\varphi$  y longitud  $\lambda$  le corresponderá en la carta uno y solo un punto de coordenadas planas  $x$  e  $y$ , y viceversa. Para transformar coordenadas geográficas del terreno en planas de la carta, lo hacemos a través de un sistema de representación cartográfica. Dicho sistema permite también la transformación inversa.

Como vemos, cada vez que nos referimos a la ubicación de un punto en el terreno lo hacemos por medio de coordenadas geográficas y cuando se trata de su ubicación en la carta hablaremos de coordenadas planas. Las coordenadas geográficas se encontrarán en un *Sistema de Referencia* y las coordenadas planas en un sistema de *Representación cartográfica*.

Por lo tanto, debemos relacionar al Sistema de Referencia con el terreno y al Sistema de Representación Cartográfica con la carta. El Sistema de Representación Cartográfica utilizado por nuestro país se denomina UTM. El Sistema de Referencia nacional actual se denomina ITRF92.

## CAPITULO 4. PROYECCIONES.

### 4.1.- GENERALIDADES

La mayoría de los topógrafos mide y registra coordenadas en un sistema de cuadrícula ortogonal. Esto significa que los puntos están definidos por su coordenada Este, su coordenada Norte y su altura ortométrica (altura sobre el nivel del mar). Las proyecciones del mapa les permiten a los topógrafos representar una superficie curva tridimensional sobre una hoja de papel plana. Estas

proyecciones se muestran como planos, pero realmente definen pasos matemáticos para especificar las posiciones sobre un elipsoide en términos de un plano.

Las proyecciones que se utilizan en la actualidad se han derivado a partir de modelos matemáticos del globo terrestre y todas ellas comparten la misma característica: mostrar la posición correcta de las líneas de longitud y latitud del Planeta. En otras palabras, cada proyección es solamente un reordenamiento de los meridianos y paralelos trasladados del Globo Terrestre a un mapa. Dado que no hay forma de eliminar los errores al trasladar una superficie curva (Tierra) a una superficie plana (mapa) ninguna proyección es geoméricamente perfecta.

En síntesis, cada proyección es elaborada a partir de una figura geométrica con un propósito particular y por ende tiene sus propias virtudes y limitaciones

### REQUISITOS DE LAS PROYECCIONES

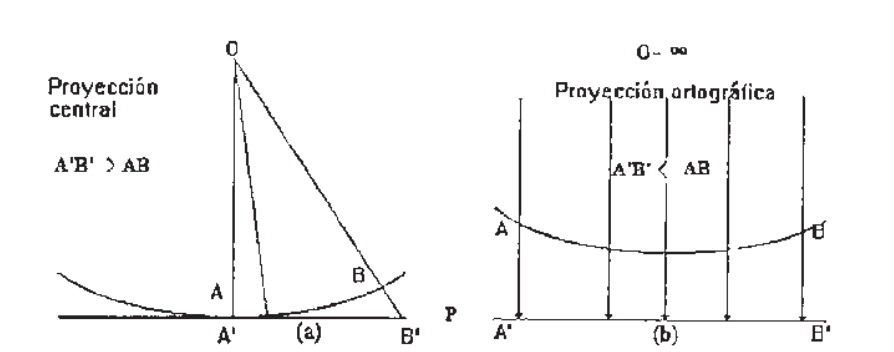
En términos generales, se requiere de una proyección que se satisfagan los siguientes requisitos:

- Mantenimiento de la escala (equidistancia),
- Preservación de las áreas (equivalencia),
- Conservación de las formas (ortomorfismo)
- Exactitud en las direcciones.

Estas cualidades no pueden ser satisfechas simultáneamente, y así, toda proyección operativa es una solución de compromiso entre éstas. Su elección depende del propósito de uso de la proyección, según el tipo de mapa.

### MANTENIMIENTO DE LA ESCALA

Es imposible mantener una escala a constante cuando se representa una superficie curva como la terrestre, sobre una superficie plana. Dependiendo del tipo de proyección, la escala puede ser constante en una cierta dirección, por ejemplo a lo largo de un meridiano, mientras que es variable en la otra, en la que la escala se deforma, esto puede verse con claridad en la siguiente figura:



En el caso de la figura (a), se tiene una proyección central (**O** es un centro de proyección definido); para puntos cercanos a **A**, no es mucha la diferencia, mientras que a medida que se va alejando del centro, la diferencia entre la longitud proyectada **A'B'** y la longitud real **AB**, se hace mayor.

Lo mismo ocurre en el caso de la proyección ortográfica de la figura (b), en la que el centro de proyección está en el infinito y por lo tanto las líneas de proyección son paralelas, solamente que ahora la relación se invierte.

Respecto a la idea anterior, se define lo que se llama *factor de escala* de una proyección, el cual es una medida de la distorsión entre la escala nominal y la escala real en un punto cualquiera de la proyección. El factor de escala es variable en el espacio cubierto por la proyección y en la mayoría de los casos según la dirección en que se midan las distancias. De este modo, se define el factor de escala (FE) como:

FE = Distancia medida en el mapa sobre la proyección  
Distancia real sobre la superficie terrestre a la escala nominal de publicación.

En la relación anterior, la escala nominal es la indicada para el mapa. Lo ideal sería tener un factor de escala igual a la unidad en cualquier punto del mapa, pero, ya se ha visto que esto es imposible y que en la realidad se producen distorsiones en mayor o menor grado. En mapas a escalas pequeñas el efecto es más notorio y puede aceptarse en determinada proporción con el objeto de satisfacer ciertos requisitos cartográficos. Sin embargo, en la cartografía a escalas medias y grandes el usuario debe estar en capacidad de medir ángulos y distancias sobre el mapa con un error despreciable. Desde el punto de vista práctico, se puede decir que no se debe permitir que la magnitud de los errores debidos a variaciones en el factor de escala supere a la de los errores naturales de trazo del mapa.

Supóngase que un límite natural y razonable en el error de trazo y marcación de detalles es de 0.2 mm y que la gran mayoría de las distancias que se pueden medir sobre el mapa no son mayores que 50 cm. Esto quiere decir que las medidas en este límite serán de:

50 cm + 0.2 mm, o sea:

50.02 y 49.98 cm

En esta forma, se considerará que el mapa no tiene errores efectivos o apreciables en la escala, si el factor de escala de la proyección está comprendido entre:

49.98 y 50.02

50.00 y 50.00

o sea, como límites prácticos:  $0.9996 < FE < 1.0004$

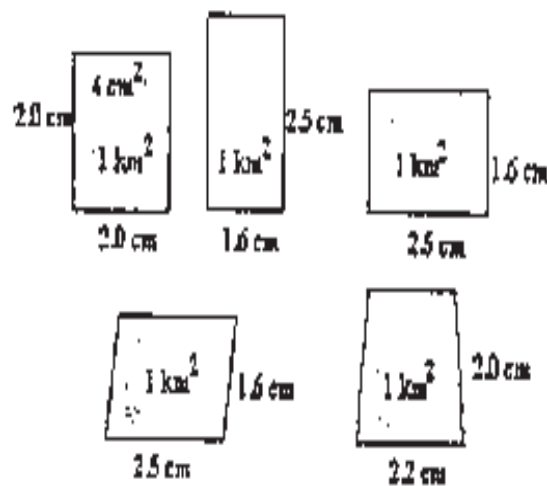
Normalmente y para efectos comparativos, en una proyección se consideran los factores de escala separadamente, tanto en la dirección de los meridianos como de los paralelos. Lo importante de estas consideraciones consiste en reconocer el hecho de que ningún mapa, debido a la proyección empleada, tiene una escala uniforme, pero que en el caso de la cartografía a escalas medias y grandes, es posible reducir el error a límites prácticos en que ya su magnitud no es significativa. A las proyecciones que conservan razonablemente la escala se les denomina *equidistantes*.

## **PRESERVACIÓN DE ÁREAS**

A fin de satisfacer determinados propósitos cartográficos, puede ser necesario que las áreas se deban representar en sus proporciones correctas; es decir, que cualquier área del mapa en relación con el área real en el terreno, esté en la misma proporción que el área cubierta por el mapa con relación a la totalidad de la región cubierta en el terreno.

Es evidente que esto puede lograrse a expensas de las formas. Así por ejemplo, un área de forma cuadrada en el terreno de 1 kilómetro por lado (un km<sup>2</sup>) puede estar representada en un mapa a la escala de 1:50,000 por un rectángulo de 1.6 x 2.5 cm, o al contrario, o en otras formas, tales que siempre se obtengan 4 cm<sup>2</sup>, véase figura 42.

En la práctica, resulta que cuando se logra la condición de preservación de áreas, se pierde la de mantenimiento de las formas y viceversa. En otras palabras, si se quiere conservar la relación de forma (un cuadrado en el mapa corresponde a un cuadrado en el terreno), ya no se preserva el área. A las proyecciones que cumplen con el requisito de preservación de áreas se les llama de *igual área*, o *proyecciones equivalentes*. Se puede demostrar matemáticamente que si el producto de los factores de escala en dos direcciones mutuamente perpendiculares es igual a la unidad, la proyección es equivalente. Se excluye el caso en que ambos factores son iguales a 1, condición que nunca se cumple. Por otra parte, cualquier proyección que tenga un factor de escala igual a la unidad en una cierta dirección, no podrá nunca ser de igual área, ya que el otro factor en la dirección perpendicular a la del primero ya no puede ser la unidad.



### CONSERVACIÓN DE FORMAS

Es evidente que resulta imposible tratar de representar correctamente la forma de un área sobre un mapa. Si esto fuera posible, todas las áreas, distancias y direcciones serían poco menos que perfectas y el problema general de las proyecciones no existiría. En mapas de escalas medias y grandes es muy importante obtener una representación de las formas prácticamente perfecta, ya que debe ser posible medir distancias y rumbos con exactitud en cualquier dirección.

Si para cualquier punto en un mapa que está en una cierta proyección se tiene que los factores de escala a lo largo de los paralelos y meridianos son iguales, y además éstos se cruzan en ángulo recto, resulta que la forma de cualquier área relativamente pequeña en el mapa, es la misma forma correspondiente en el terreno.

Las dos condiciones anteriormente apuntadas definen lo que se llama una proyección *conforme* u *ortomórfica*.

### TIPOS DE PROYECCIONES

Por lo que se ha visto el término de proyección se refiere a la representación de la superficie terrestre sobre una superficie plana de acuerdo con ciertas reglas de perspectiva. El concepto así

definido es puramente geométrico sin embargo la mayoría de las proyecciones son una modificación matemática del canevas que se hubiera obtenido de la sola aplicación de las reglas de la perspectiva, lo que se ha hecho para satisfacer de cierta medida determinados requisitos

Las superficies o planos de proyección tienen que ser planos, no necesariamente antes de proyectar, lo que permite el uso de superficies desarrollables como las del cilindro y el cono. Se concibe igualmente que las superficies empleadas tocan la superficie terrestre en forma tangente o la cortan en cualquier lugar y que el centro de la proyección está igualmente en cualquier sitio, aunque en la mayoría de las proyecciones en su uso actual, es el centro de la Tierra, en cuyo caso se tienen las proyecciones centrales o gnomónicas. Si el centro de la proyección está en el punto antipodal por ejemplo, se tienen el grupo de proyecciones estereográficas y si este se va al infinito, como ya se vio, se tienen las proyecciones ortográficas.

#### **4.2.- CLASIFICACION DE LAS PROYECCIONES.**

Las proyecciones admiten diversas clasificaciones dependiendo de sus cualidades, fundamentos, propiedades, etc.

##### **4.2.1.- CLASIFICACIÓN DE ACUERDO AL TIPO DE FIGURA GEOMETRICA A EMPLEAR**

Desde el punto de vista de construcción geométrica y según la superficie de proyección que se emplee, las proyecciones pueden ser:

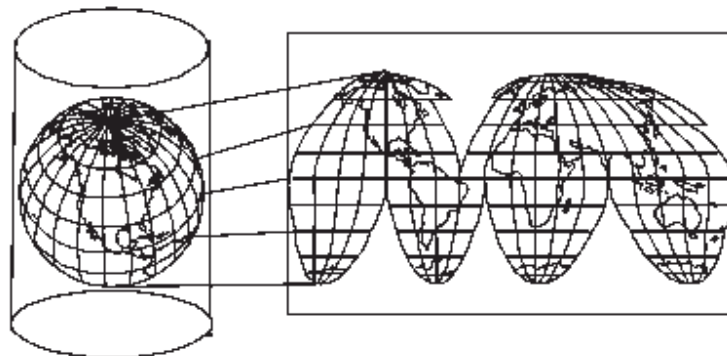
- Cilíndricas
- Cónicas
- Acimutales

A las que podrían una cuarta categoría de proyecciones neutras o convencionales, diseñadas más que todo para satisfacer ciertos requisitos de presentación a escalas muy chicas.

##### **PROYECCIONES CILINDRICAS**

En este tipo de proyección el centro de proyección está en el centro de la Tierra y el plano de proyección es la superficie interna de un cilindro tangente a la superficie terrestre, algo así como introducir una pelota a un tubo. La concepción más simple es la representada en la que el cilindro se hace tangente al ecuador. Una vez que se han proyectado los detalles, se corta el cilindro a lo largo y se extiende es decir, se desarrolla, obteniéndose así un patrón en que los meridianos son líneas rectas paralelas, pero con un espaciamiento que aumenta rápidamente hacia los polos, los que como puede verse, no se pueden proyectar; su proyección está en el infinito.

En este tipo de proyección que los círculos máximos pueden trazarse como líneas rectas, por lo que es de mucha ayuda a la navegación.



Como se puede apreciar en la proyección, las deformaciones aumentan en magnitud a medida que la proyección se extiende hacia los polos.

La llamada proyección simple o Plate Carreé (placa cuadrada) es una variante del concepto general anterior y constituye una de las más antiguas proyecciones, concebida en la época griega y usada por Eratóstenes alrededor del año 300 a.c. En dicha proyección los meridianos se representan por líneas rectas paralelas equidistantes y de la misma longitud que los meridianos terrestres (en el caso anterior son de longitud infinita); los paralelos son perpendiculares a los meridianos y están representados por líneas rectas paralelas equidistantes y de igual longitud que el Ecuador. En una proyección del Globo Terrestre lo que se obtiene es una cuadrícula regular.

Por construcción, la proyección conserva la escala a lo largo de los meridianos, pero no así en los paralelos, pues el único que tiene correcta la escala es el Ecuador (la línea de tangencia con el cilindro), mientras que en los demás paralelos la escala se va haciendo más y más chica a medida que se avanza hacia los polos. En el caso extremo de los polos que son puntos, quedan representados en la proyección por una línea de 40,000 km de longitud, lo que es una deformación extrema.

La proyección no es equivalente ni conforme, no tiene utilidad práctica en cartografía topográfica y se ha descrito solamente con el objeto de que se visualice mejor la idea acerca de las proyecciones cilíndricas y lo que puede hacerse en términos de las variaciones matemáticas que pueden introducirse dentro del concepto geométrico.

Para confirmar un poco más la idea se tiene la Proyección de Mercator, que es una proyección en la que conservando las demás características descritas, se varía el factor de escala a lo largo de los meridianos (antes era constante) de modo que sea igual al factor de escala a lo largo de los paralelos, logrando en esta forma que la proyección sea conforme u ortométrica. Si con el concepto de la proyección cilíndrica simple o Plate Carreé se toma el cilindro y se le da un giro de  $90^\circ$  de modo que ahora sea tangente a un meridiano, se obtiene la llamada Proyección Cilíndrica Transversa o Proyección de Cassini.

También se da el caso de proyecciones cilíndricas oblicuas, que son los casos entre las posiciones normal y transversa del cilindro, con lo que las variedades son prácticamente infinitas.

### PROYECCIONES CÓNICAS.

En este tipo de proyección el centro de proyección sigue siendo el centro de la Tierra, pero el plano de proyección es ahora la superficie interna de un cono tangente a la esfera, como si se introdujera

una pelota dentro de un vaso cónico de papel. El caso más simple es el de un cono tangente a lo largo de un cierto paralelo de referencia.

Después de proyectarse corta el cono a lo largo de una generatriz y se desarrolla obteniéndose el patrón indicado en la figura, en donde los meridianos son líneas rectas convergentes uniformemente espaciadas y los paralelos son círculos concéntricos alrededor del vértice del cono, con un espaciamiento variable que aumenta a medida que se avanza (en este caso) hacia las latitudes menores. El polo Norte se proyecta en el vértice del cono, mientras en el polo sur se va al infinito.



Existe una gran variedad de proyecciones cónicas que dependen de la posición del vértice del cono (más o menos alto), de la orientación del eje del mismo (normal, transversal u oblicuo), e inclusive del uso de un cono secante, con dos paralelos de referencia, o de múltiples conos. Mediante variaciones matemáticas, se pueden desarrollar proyecciones cónicas con ciertas propiedades, la más común de las cuales es el ortomorfismo. Una de las más populares es la Proyección Cónica Conforme de Lambert, que es una proyección secante con dos paralelos de referencia a lo largo de los cuales la escala es correcta. Otra es la llamada Proyección Polifónica, en la que se usan varios conos tangentes con un espaciamiento en latitud de un grado. La proyección resultante no es conforme, equivalente o equidistante, pero proporciona una buena solución de compromiso entre estas tres características.

### **PROYECCIONES ACIMUTALES (O CENITALES)**

En las Proyecciones acimutales se utiliza como plano de proyección una superficie plana tangente a la superficie del esferoide en un punto dado, solamente que ahora en el centro de proyección puede estar en distintas posiciones.

Si el centro de proyección está en el centro de la Tierra se tiene la llamada *Proyección Gnomónica*.

Cuando el centro de proyección se sitúa en el punto diametralmente opuesto al de tangencia, resulta la denominada *Proyección Estereográfica*.

En el caso en que el centro de proyección se vaya al infinito, los rayos de proyección se hacen paralelos y se obtiene entonces la *Proyección Ortográfica*.

Observando la figura, se nota que la proyección Gnomónica es la que produce las mayores distorsiones y que inclusive puntos como el Polo Sur no se pueden proyectar, mientras que la proyección Ortográfica es la que causa las menores deformaciones.

Las más conocidas de las proyecciones acimutales son aquellas en que el plano de proyección se hace tangente a uno de los polos terrestre, en cuyo caso se tienen según la posición del centro, las proyecciones Polares Gnomónica, Estereográfica y Ortográfica respectivamente. El patrón que se observa en la figura es el de una serie de círculos concéntricos que representan los paralelos de latitud centrados en el origen del ecuador, y se observan espaciamientos variables, mientras que los meridianos son líneas rectas divergentes a partir del polo, uniformemente espaciadas. Obsérvese en la figura el caso de la Proyección Estereográfica Polar.

En esta proyección en particular se pueden igualar los factores de escala de modo que se logre el ortomorfismo.

La proyección no es equivalente, pero resulta que los factores de escala no son excesivos y así la exageración en área no es mucha. Su importancia reside en el hecho de que es conforme y por lo tanto puede usarse en la cartografía de escalas medias y grandes para las regiones polares, es decir en las altas latitudes. En la práctica cartográfica se usa al norte del paralelo de  $84^{\circ}$  N y al sur de  $80^{\circ}$  S para completar el cubrimiento de la Proyección Universal Transversa de Mercator, que se describe más adelante.

Una observación con respecto a todas las proyecciones discutidas hasta el momento:

Si en el caso de la proyección cónica del vértice del cono se va al infinito se obtiene la proyección cilíndrica, mientras que en el extremo opuesto, cuando la altura del vértice del cono se hace nula, resulta la proyección acimutal, con lo que puede verse que tanto como las cilíndricas como las acimutales son casos especiales de la proyección cónica.

#### **4.2.2.- CLASIFICACION DE ACUERDO A SUS ATRIBUTOS.**

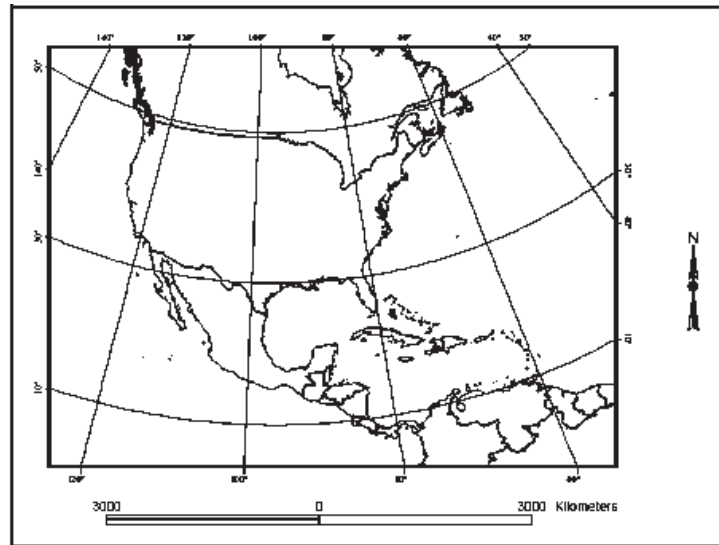
Las proyecciones se clasifican de acuerdo a sus atributos en:

- Proyecciones Equivalentes
- Proyecciones Conformes

#### **PROYECCIONES EQUIVALENTES**

Las proyecciones de tipo equivalente se caracterizan por su capacidad de mantener una razón constante de superficie a lo largo y ancho del mapa. En otras palabras el tamaño de un objeto en la superficie terrestre no es afectado por su posición en el mapa.

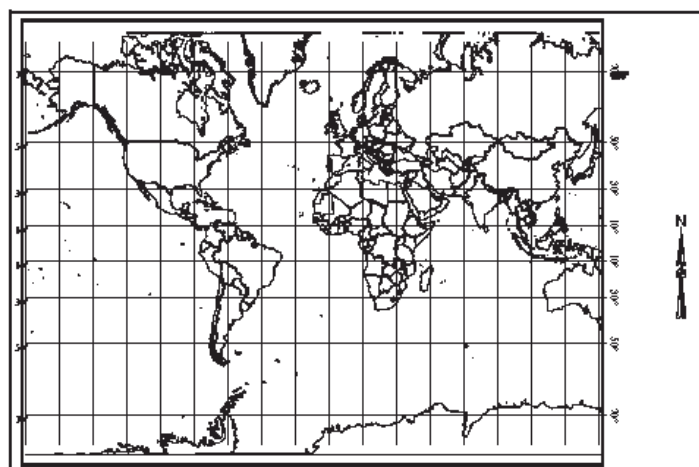
Esta proyección es útil para mostrar la distribución de variables geográficas ya que el tamaño de la superficie es independiente de su posición en el mapa y por lo tanto elimina errores cuando comparamos áreas de diferentes dimensiones en diferentes partes del Planeta. Por ejemplo, en un mapa de una proyección equivalente 1cm<sup>2</sup> representa la misma área en los Estados Unidos, Argentina, Siberia y Costa Rica. Sin embargo la exactitud en tamaño se logra a expensas de una distorsión en las formas de los objetos o superficies



### PROYECCIONES CONFORMES.

La proyección *conforme* se caracteriza por mantener la forma de los objetos o superficies que se muestran en el mapa. En esta proyección las relaciones angulares no son distorsionadas y por lo tanto los objetos o superficies mantienen en el mapa la forma que tienen en la superficie terrestre. Las proyecciones de tipo conforme tienen meridianos y paralelos que se cruzan en ángulo recto, tal y como sucede en el globo terráqueo.

La desventaja de las proyecciones de tipo conforme es que *distorsionan* fuertemente el *tamaño* de las superficies cartografiadas y como consecuencia la escala no es constante entre regiones del Mapa. Por ejemplo, en un mapa mundi las superficies en altas latitudes se muestran más grandes de lo que realmente lo son. Por ejemplo, en la proyección de Mercator Groenlandia aparece mucho más grande que África, Australia y América del Sur. Sin embargo en la realidad África es 14 veces más grande que Groenlandia, América del Sur 9 veces más grande y Australia 3.5 veces más grande.



Las propiedades de equivalencia y conformalidad son mutuamente excluyentes, excepto para mapas de gran escala (Ej. áreas muy pequeñas). En la práctica los mapas se hacen utilizando una de las dos proyecciones.

#### 4.3. PROYECCION UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR.

Las coordenadas geodésicas (latitud y longitud) son representadas sobre mapas o cartas, por proyecciones matemáticas conformes, que permiten llevar las mediciones geodésicas al plano.

El sistema de proyección de Mercator es un sistema cilíndrico transversal conforme, tangente al elipsoide de referencia a lo largo de un meridiano origen. Ahora bien, este sistema aplicado a grandes extensiones en longitud, hace que, según se va alejando del meridiano de tangencia, las deformaciones alcancen valores considerables. Por esta razón se subdivide la superficie terrestre en 60 husos iguales de 6° de amplitud, que constituyen 60 proyecciones iguales, pero referida cada una al meridiano central del huso respectivo y al Ecuador. Las fórmulas de transformación que definen el sistema, se aplican para cualquier huso, así como todos sus parámetros son válidos para representar la superficie de la Tierra en base a un elipsoide de revolución cuyo eje es el terrestre.

La proyección UTM es conforme, siendo el meridiano central de cada huso automecóico y representado según una línea recta. La utilidad que tiene esta proyección, por su conformidad como aplicación a los problemas geodésicos, la hace recomendable para la representación de casi todos los países del globo, exceptuando aquellas zonas situadas a + 80° de latitud en donde debe complementarse con una proyección estereográfica.

Las condiciones que se imponen a esta proyección son:

1. La proyección será conforme.
2. El meridiano central será automecóico.
3. El Ecuador y el meridiano central de cada huso (-69° y -75° para Chile) se representarán por líneas rectas.
4. El origen de coordenadas en la proyección será el correspondiente a la intersección del Ecuador y el Meridiano Central del huso.

Los parámetros que definen la proyección UTM son:

- Primer meridiano central (huso 1) = 177° longitud oeste
- Separación entre husos = 6°
- Factor central de escala = 0.9996
- Este Falso = 500 000 m
- Norte Falso = 10 000 000 m

Los problemas que se presentan al analizar esta proyección son:

- 1) Transformación de coordenadas geográficas en UTM y viceversa.
- 2) Cálculo de convergencia de meridianos.
- 3) Determinación del Coeficiente de deformación lineal.
- 4) Cálculo de reducción a la cuerda.
- 5) Cálculo de acimutes UTM y geodésico.
- 6) Cálculo de distancia y cota geodésica.
- 7) Transformación de distancia geodésica a plana UTM.
- 8) Obtención de Coordenadas geográficas y UTM.

Por convención, cada una de las zonas se divide en fajas transversales de 4 grados de latitud, (en la zona en donde se encuentra México, un grado equivale aproximadamente a 110 Km.) las cuales son

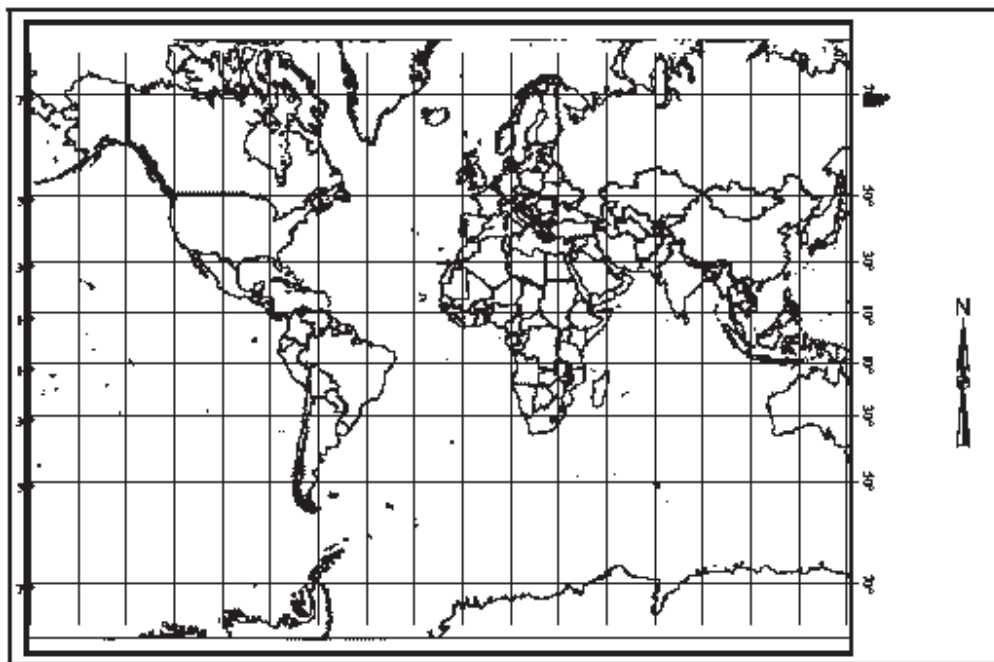
identificadas para la primer faja a partir del ecuador, a México le corresponden las fajas D, E, F, G, H e I, como se muestra en la figura siguiente:



Esta proyección es semejante a la de Cassini en el sentido de que el eje del cilindro está girado  $90^\circ$ , con la diferencia de que este no es tangente, sino secante al esferoide, lo que se hace con el propósito de reducir la magnitud del factor de escala.

Si se trata de proyectar la superficie terrestre de grandes extensiones, se obtendrá un patrón sumamente deformado, pero para áreas vecinas a la zona secante, la proyección resulta extremadamente uniforme en escala, conforme y equivalente. Para lograr esto, además de las transformaciones matemáticas envueltas, cada zona UTM es proyectada a la vez, con lo que en realidad se obtienen 60 proyecciones iguales. El procedimiento consiste en centrar cada meridiano central en la zona de corte secante, proyectar, avanzar  $6^\circ$  a la siguiente zona, proyectar, y así sucesivamente. De este modo, limitando la proyección a cada zona de  $6^\circ$  se reducen las deformaciones a valores compatibles con la cartografía de escalas medias y grandes.

El cilindro se hace secante con el objeto de limitar el valor del factor de escala, como puede notarse en la figura siguiente (muy exagerada).



Si se conservara tangente el cilindro, el factor de escala en el meridiano central sería la unidad, pero en el límite de la zona de  $6^\circ$  tendría un valor de 1.0009, mientras que con el cilindro secante se balancean los errores, de modo que a lo largo del meridiano central el factor de escala vale 0.9996, en los dos meridianos simétricos a  $1.6^\circ$  del meridiano central vale 1.0000 y en los extremos de la zona tiene un valor de 1.0004.

Estas cantidades, como puede verse son compatibles con las obtenidas para la precisión requerida teniendo en cuenta la precisión de trazo marcación.

Cabe recordar que esta proyección tiene un rango de aplicación entre los  $84^\circ$  N y los  $80^\circ$  S de latitud, más allá de los cuales es sustituida por la Proyección Universal Estereográfica Polar (UPS).

La UTM es la proyección utilizada en el INEGI para su cartografía de escalas medias y grandes (no menos que 1:500,000), así como en la mayoría de otras instituciones nacionales y del exterior. De hecho, la mayor parte de la cartografía topográfica americana está en este tipo de proyección junto con su cuadrícula asociada del mismo nombre. Como una opción a la UTM se acostumbra el uso de la Proyección Cónica Conforme de Lambert y en ocasiones sobre un mismo mapa y para regiones poco extensas se han señalado sobre la cuadrícula UTM marcas de una cuadrícula asociada con la proyección Lambert.

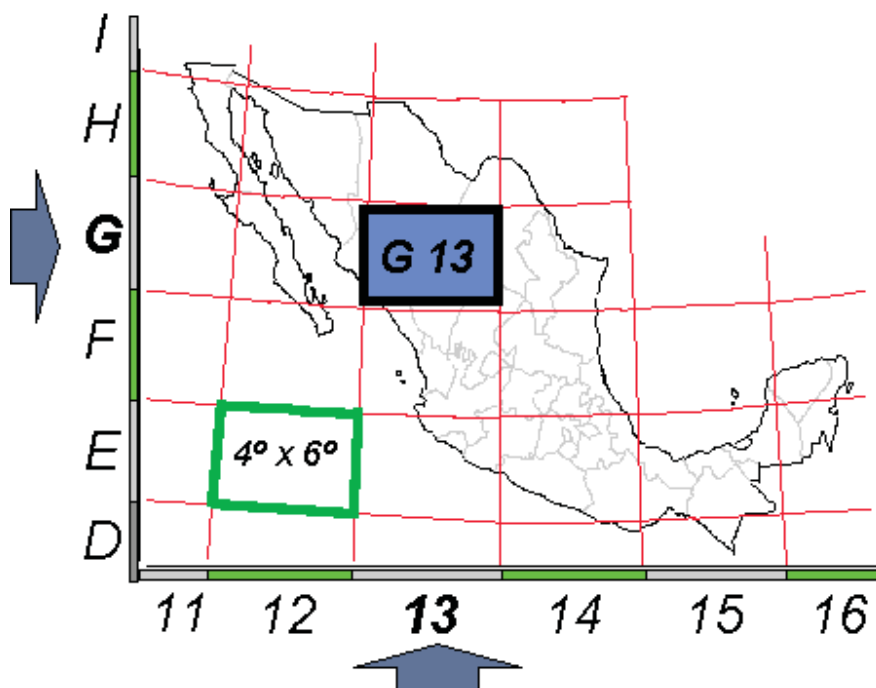
Toda proyección es susceptible de una expresión matemática que permite obtener los valores de coordenadas rectangulares en función de las coordenadas geográficas. De este modo el conversor correspondiente a una proyección dada puede trazarse con facilidad sobre un sistema cartesiano, sobre todos si se dispone de un coordinatógrafo preciso, o un graficador electrónico. (Ambos son utilizados en el INEGI).

Las proyecciones utilizadas en el INEGI son la UTM para escala hasta 1:500.000, la Cónica Conforme de Lambert con dos paralelos base a  $17^\circ 30'$  y  $29^\circ 30'$ , y la Proyección de Mercator simple para la cartografía oceanográfica.

#### 4.4.- ASIGNACION DE CLAVES CARTOGRAFICAS A LAS CARTAS TOPOGRAFICAS

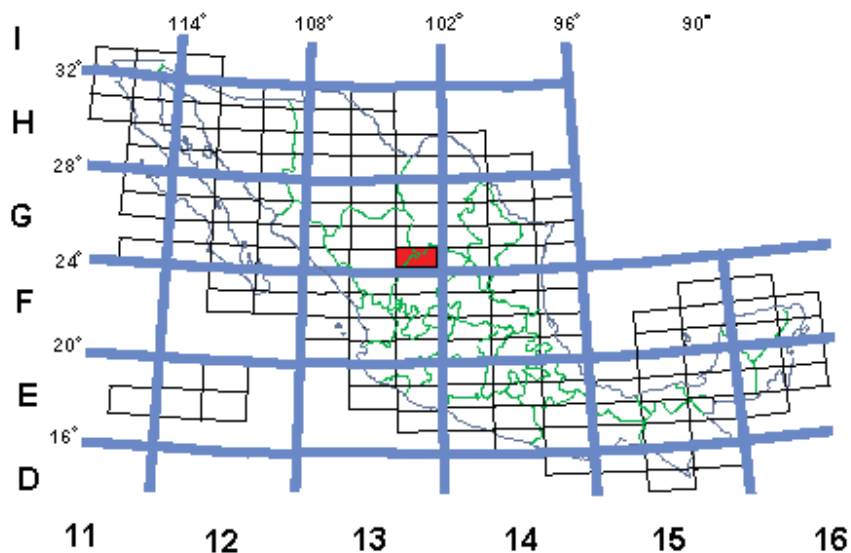
Para los conjuntos de datos escala 1:1 000 000 con formato de 4° de latitud por 6° de longitud, la nomenclatura es la correspondiente a la letra de la "faja" y los dígitos de la "zona", ejemplo: "G13".

ESCALA 1:1 000 000



Para obtener cada uno de los conjuntos de datos en escala 1:250 000, las áreas de 4° x 6° se dividen en 12 partes, cada una identificada con la clave de la "faja" y de la "zona", más el dígito correspondiente del uno al doce, para así ubicar de manera única a cada conjunto, por ejemplo : G-13-12

ESCALA 1: 250,000



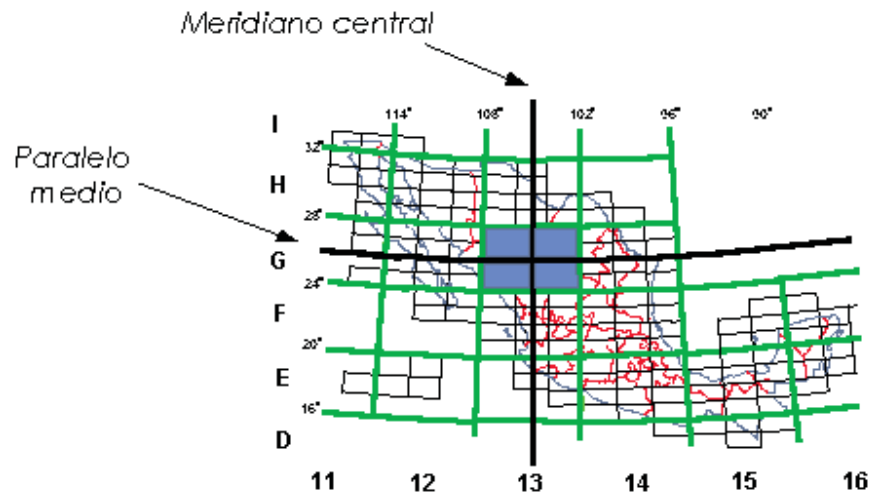
|    |    |    |
|----|----|----|
| 1  | 2  | 3  |
| 4  | 5  | 6  |
| 7  | 8  | 9  |
| 10 | 11 | 12 |

Cada carta tendrá 1° de latitud por 2° de longitud

Para obtener una carta 1:50,000 primero debemos partir "fajas" de 4° de latitud y 6° de longitud ("zonas" U.T.M.).

Luego, cada cuadrante de 4° x 6° es subdividido en cuatro "sectores" iguales, por medio del meridiano central de cada "zona UTM" y del paralelo medio de cada "faja"

ESCALA 1:50,000



Los "sectores" obtenidos tienen un formato de 2° de latitud por 3° de longitud y se nombran A, B, C, D, con lo que cada "sector" se identifica de modo único, por ejemplo, G 13 A, G 13 B, G 13 C, G 13 D y por último...

Cada uno de los "sectores" (como el G 13 D), se divide en 8 renglones de 15' de latitud y en 9 columnas de 20' de longitud. Con lo que se completa la nomenclatura de la carta anotando el número de renglón y columna correspondientes.

|   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 11 |    |    |    |    |    |    |    |    | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 2 |    | 22 |    |    |    |    |    |    |    | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| 3 |    |    | 33 |    |    |    |    |    |    | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| 4 |    |    |    | 44 |    |    |    |    |    | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 |
| 5 |    |    |    |    | 55 |    |    |    |    | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 |
| 6 |    |    |    |    |    | 66 |    |    |    | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 |
| 7 |    |    |    |    |    |    | 77 |    |    | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 |
| 8 |    |    |    |    |    |    |    | 88 | 89 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 |
| 1 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 2 | 21 | 22 |    |    |    |    |    |    |    | 21 | 22 |    |    |    |    |    |    |    |
| 3 | 31 |    | 33 |    |    |    |    |    |    | 31 |    | 33 |    |    |    |    |    |    |
| 4 | 41 |    |    | 44 |    |    |    |    |    | 41 |    |    | 44 |    |    |    |    |    |
| 5 | 51 |    |    |    | 55 |    |    |    |    | 51 |    |    |    | 55 |    |    |    |    |
| 6 | 61 |    |    |    |    | 66 |    |    |    | 61 |    |    |    |    | 66 |    |    |    |
| 7 | 71 |    |    |    |    |    | 77 |    |    | 71 |    |    |    |    |    | 77 |    |    |
| 8 | 81 |    |    |    |    |    |    | 88 | 89 | 81 |    |    |    |    |    |    | 88 | 89 |

**G 13 D 89**

En resumen, la nomenclatura se determina así:

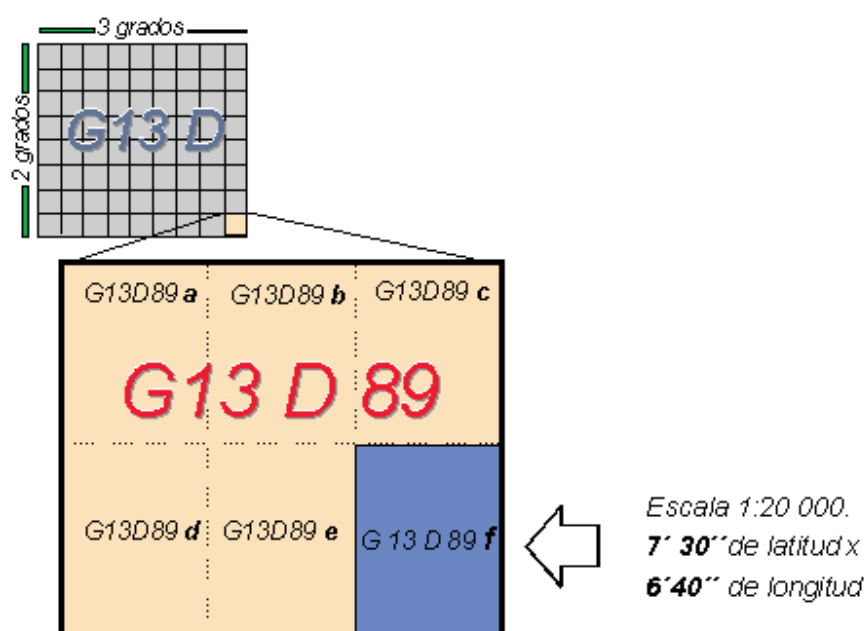
1. La letra de la faja
2. Los dígitos de la zona
3. La letra del sector
4. La combinación de los dígitos del renglón y de la columna.

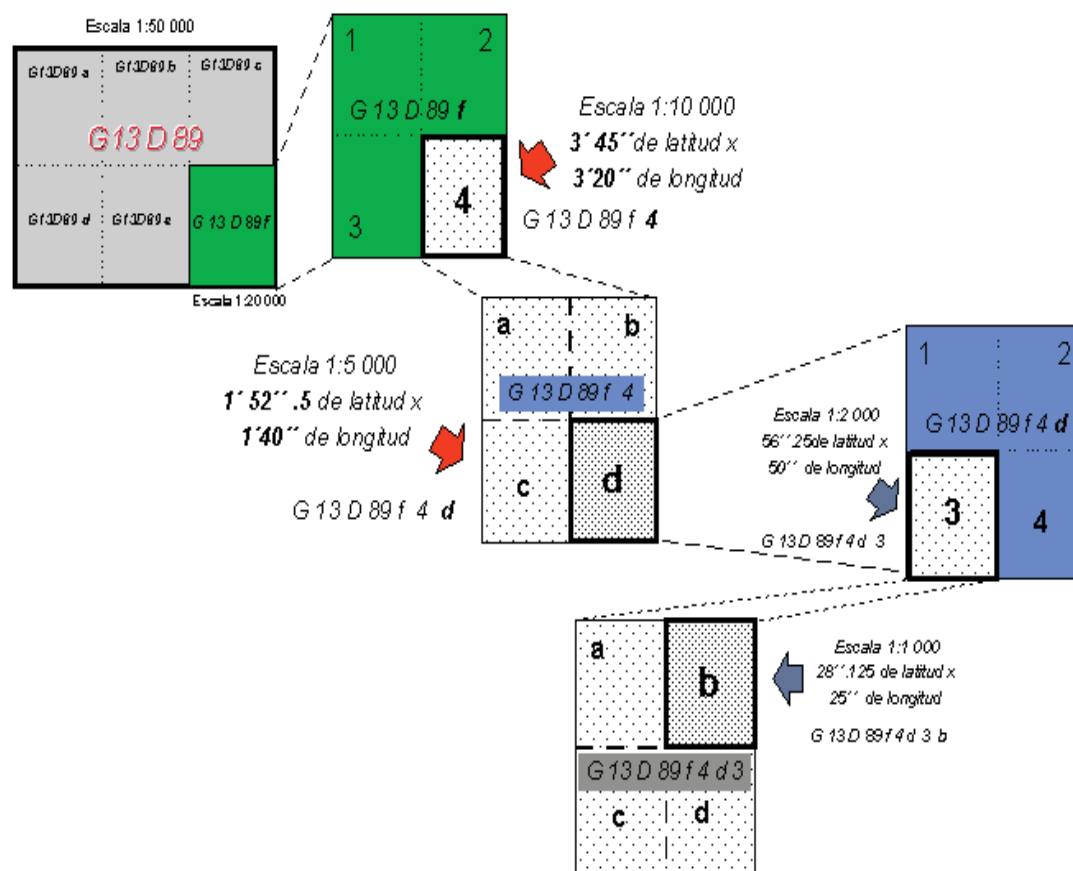
Quedando así:

G-13-D-8-9

Cada uno de los conjuntos de datos de escala 1:50 000 (como el G13 D 89), se subdivide en 6 cuadrángulos iguales denominados a, b, c, d, e, f. Por lo que los conjuntos de datos de escala 1:20 000 del INEGI presentan un formato de 7' 30'' de latitud por 6' 40'' de longitud.

ESCALA 1:20,000





## CAPITULO 5. GEODESIA ESPACIAL.

### 5.1.- GENERALIDADES.

En geodesia clásica, la determinación de la latitud y longitud de un punto se basa en la observación de ángulos y distancias a otros puntos situados también sobre la superficie terrestre.

Frente a dicho esquema de trabajo, en la década de los 50 surge una nueva etapa de la geodesia debido al perfeccionamiento de nuevas técnicas de observación: radar, láser, doppler, interferométricas, altimétricas, etc., medida del tiempo con relojes atómicos, y nuevos métodos de cálculo electrónico, que contribuyen a la determinación muy precisa de ángulos y distancias. Esta nueva etapa de la geodesia se desarrolla efectuando observaciones exteriores a la tierra, tales como globos, satélites, la luna, fuentes extragalácticas, etc., dando lugar a un conjunto de técnicas que constituyen lo que se denomina geodesia espacial.

Con la geodesia espacial se han podido abordar dos cuestiones fundamentales pendientes, a saber, por una parte el enlace de los diversos elipsoides regionales, pudiéndose hablar por primera vez de geodesia global. Por otra, el llevar a cabo las determinaciones calculando a la vez las tres coordenadas, lo que ha inducido a muchos autores a referirse a este nuevo período como el de la

geodesia tridimensional, remarcando de este modo la gran diferencia de los nuevos métodos con respecto a los de la geodesia clásica o bidimensional, en la que la altitud es obtenida de modo distinto que la longitud y latitud, haciendo uso de una superficie convencional (geoide o elipsoide). El uso de los satélites en geodesia, tanto para determinar coordenadas como en estudios de tipo geodinámico, introduce un elemento apenas considerado en la geodesia clásica: la medida del tiempo, ya que los satélites son jalones móviles que se desplazan a gran velocidad, por lo que podemos hablar de una geodesia tetradimensional. En otras palabras, buscando la posición de un receptor de señales de un satélite, deberemos determinar cuatro incógnitas. Otro aspecto importante de la geodesia con satélites es el papel relevante que adquiere el centro de gravedad terrestre.

En la actualidad la geodesia espacial tiene a su disposición varios tipos de satélites, tanto activos como pasivos, y los programas en desarrollo son muy diversos.

Dependiendo del tipo de satélites, estos se aplican a tareas tan diversas como: levantamientos geodésicos, desplazamientos geotécnicos, aplicaciones hidrográficas, posicionamiento dinámico, conservación del tiempo, o cuestiones globales tales como movimiento del polo, rotación de la Tierra, etc.

A modo de ejemplo, y refiriéndonos concretamente a la conservación del tiempo, recordemos que la escala de Tiempo Atómico Internacional resulta de la continua comparación de la hora entre los servicios de tiempo más importantes del mundo.

Esta comparación se realiza con transportes de esos relojes de un centro a otro, o bien a distancia, mediante señales de radiofrecuencia. Pues bien, el sistema de posicionamiento global (GPS) es capaz de proveer de un tiempo auxiliar de referencia para que dos o más estaciones comparen su hora con precisiones competitivas con respecto a la de los métodos tradicionales.

En la actualidad, la posibilidad de usar constelaciones de satélites como el sistema de posicionamiento global (GPS) con fines geodésicos y geodinámicos, han llevado a una auténtica revolución en los planteamientos de la geodesia. Baste con mencionar el hecho de que usar observaciones "simultáneas" es hoy una rutina. Sin embargo, esto mismo plantea cuestiones tales como la selección "óptima" de satélites a observar, o el modo más eficaz de procesar los datos recibidos, etc. Todo esto hace que muchos autores se refieran hoy a la geodesia bajo el nombre de geomática por la variedad de algoritmos disponibles y la necesidad de un soporte informática para el manejo de los mismos.

## **5.2.- METODOS DE LA GEODESIA ESPECIAL**

En esencia, dichos métodos tienden, de una parte, a determinar de manera precisa la posición de un satélite en su órbita y por otra, a utilizar el conocimiento previo y preciso de esa órbita, para deducir con secuencias de carácter geodésico.

En función del tipo de medidas que se pueden realizar, los satélites se denominan activos o pasivos. Los primeros están equipados con transmisores de varios tipos, los segundos disponen de sistemas para reflejar las radiaciones incidentes. De manera más concreta los satélites empleados en medidas geodésicas, pueden estar equipados con: Destellos de luz (light flashes) de gran intensidad, transponders para recibir y transmitir microondas, transmisores que emiten frecuencias estables de manera continua, para medidas Doppler, transmisores de radar y de láser, relojes de cuarzo, rubidio o cesio, reflectores de láser, altímetros de radar, etc.

En concreto, las observaciones y medidas más empleadas en la actualidad, que describiremos sucintamente en lo que sigue, pueden encuadrarse en los siguientes apartados:

1) medidas de dirección de satélites

- 2) medida de distancias observatorio-satélite
- 3) medidas Doppler
- 4) altimetría de satélites
- 5) medidas interferométricas de larga base (VLBI).
- 6) medidas láser a satélites (SLR)
- 7) telemetría láser sobre la Luna (LLR)

#### **5.2.1.- MEDIDAS DE DIRECCIÓN DE SATÉLITES.**

Este tipo de observaciones, efectuadas desde un observatorio, consisten en fotografiar la imagen del satélite contra un fondo de estrellas. Para ello son empleadas diversos tipos de cámaras (balísticas, astronómicas y orbitales) que son adosadas a un anteojo astronómico con montura acimutal o ecuatorial.

Las cámaras balísticas, de pequeña distancia focal (300 a 1000 mm.) y gran campo (30' a 10'), son montadas sobre un teodolito y proporcionan las coordenadas del satélite en un instante dado. La principal ventaja de estas cámaras reside en su posible utilización en cualquier lugar. Son bien conocidas la cámara Baker-Nunn y la cámara Wild BC4 que está montada sobre un teodolito Wild T4.

Las cámaras astronómicas, montadas sobre un anteojo ecuatorial, permiten fotografiar diversas posiciones del satélite contra un fondo fijo de estrellas en forma de pequeños trazos. Suelen tener mayores distancias focales ( $> 1000$  mm / y pequeños campos (10' a 5'), pudiendo contrastar la posición del satélite con respecto a estrellas de mayor magnitud.

Las cámaras orbitales, al igual que las anteriores, son montadas sobre un anteojo ecuatorial en estación, que permite seguir los movimientos del satélite.

La órbita es calculada por medio de sus elementos orbitales y la cámara lo sigue en el plano orbital (cámara triaxial), de manera que las desviaciones del satélite con respecto al plano orbital pueden ser obtenidas si se utiliza un cuarto eje.

La medida de las coordenadas (x, y) del satélite sobre la placa fotográfica, son efectuadas por medio de un comparador muy preciso y posteriormente transformadas a coordenadas topocéntricas ecuatoriales. En tales observaciones es necesario tener en cuenta efectos sistemáticos de distorsión, errores del comparador, influencia de la refracción astronómica, turbulencias atmosféricas, emulsión fotográfica, etc., de manera que la precisión alcanzada con estas medidas oscila entre  $\pm 0.2$  y  $\pm 2$ " segundos de arco.

#### **5.2.2.- MEDIDAS DE DISTANCIAS OBSERVATORIO-SATÉLITE.**

La medida de la distancia que existe, en un instante dado, entre un observatorio y un satélite artificial, consiste en medir el tiempo que tarda una onda electromagnética en recorrer dicha distancia.

Los métodos empleados para ello son: las medidas de radar y las medidas de láser. Las primeras (en el dominio de ondas centimétricas o decimétricas) son independientes de las condiciones meteorológicas que existen al ser efectuadas, en tanto que las medidas de láser requieren la existencia de un reflector de láser en el satélite y un cono cimiento previo (visual o no) de la posición del satélite, dependiendo en gran parte de las condiciones meteorológicas. En ambos casos la propagación está afectada de manera significativa por la refracción atmosférica.

Por ejemplo, en el sistema SECOR (Sequentia l Collation of Range), desarrollado en Estados Unidos, trabajando sobre medidas de fase con microondas, se pudieron realizar numerosas medidas durante el paso de satélites, con una precisión del orden de  $\pm 1.5$  m. sobre una altitud de 1.500 km., después de ser efectuadas correcciones por refracción troposférica e ionosférica.

Asimismo, con medidas de radar en las bandas de 2 a 4 GHz y 4 a 6 GHz, se llegó a determinar la distancia con errores comprendidos entre  $\pm 2$  m. y  $\pm 5$  m., no pareciendo posible obtener una precisión mayor. Sin duda la ventaja de poder observar a cualquier hora y con condiciones meteorológicas adversas, queda compensada con la laboriosidad que requieren estas medidas.

La realización práctica de cualquiera de estos métodos de medida consiste en:

- observar el tiempo,  $Dt$  que tarda la onda en desplazarse desde el observatorio al satélite (modo 1), o a la inversa, cuando se dispone de un reloj en el observatorio y otro en el satélite, (por ejemplo, en el sistema SLR (Satellite Laser Ranging))
- observar el tiempo  $2Dt$  que tarda la onda en ir al satélite y volver al observatorio (modo 2).

La distancia se obtiene multiplicando el incremento de tiempo por la velocidad de propagación.

En el primer caso se supone que ambos relojes están sincronizados o que el correspondiente error de sincronización puede ser determinado (sistema GPS, Global Positioning System) por técnicas accesorias.

En cualquier caso suelen emplearse dos métodos de medida: uno por medio de un impulso que pueda ser identificado, como ocurre en el sistema SLR, o bien por el método de comparación de fase, donde la fase de la onda portadora es usada como un observable. En el modo 2, la fase de la onda emitida es comparada con la fase de la onda que retorna. En el modo 1, la fase de la onda emitida es comparada la fase de una señal generada en el interior del receptor. En ambos casos la diferencia de fase observada  $DF$ , corresponde a la porción residual  $DI$ , de una completa longitud de onda. En principio, el número total  $N$ , de ondas completas, entre el observador y el satélite, es desconocido, lo que constituye un problema de ambigüedad, resultando en el modo 2,

Existen diferentes métodos de obtener el valor de  $N$ , por ejemplo:

1. Efectuando medidas con diferentes frecuencias (por ejemplo. SECOR).
2. Determinando distancias aproximadas con precisión superior a  $1/2$  (por ejemplo. GPS con código P y fases de la onda portadora).
3. Usando el cambio de la geometría del satélite con el tiempo (por ejemplo GPS con observaciones de fase de la onda portadora).

La precisión alcanzada con las medidas de láser depende del tipo instrumental utilizado, pero se puede asegurar que llega a ser del orden de  $\pm 5$  cm., para una sola medida con equipos de la tercera generación y del orden de  $\pm 1$  cm., para puntos normales.

**5.2.3.- MEDIDAS DOPPLER.**

Están basadas en el conocido efecto Doppler, variación que sufre la frecuencia observada por el receptor cuando el foco emisor se mueve. La ionosfera y la troposfera son causas de error y para corregir sus efectos, se utilizan dos métodos, uno basado en el cálculo con modelos ionosféricos y troposféricos y el otro basado en la emisión de dos o más frecuencias.

Las medidas Doppler, que operan con radio ondas, son independientes del tiempo y de las condiciones meteorológicas que existan, por lo cual puede acumularse un gran número de observaciones, que permiten su procesamiento automático. Dichas observaciones han sido empleadas, preferentemente en la mejora de órbitas de satélites artificiales y en una mayor precisión de las coordenadas de los observatorios que las utilizan.

**5.2.4.- ALTIMETRÍA DE SATÉLITES.**

La altimetría de satélites tiene por objeto medir la distancia vertical existente, en un instante dado, entre el satélite y la superficie de la Tierra o más concretamente entre el satélite y la superficie de los océanos. Para, ello, el satélite transporta un altímetro de radar que opera en una frecuencia de 14 GHz, correspondiente a una longitud de onda de 2 cm., y emite pulsos de 10 a pocos ns., con una resolución de 1 m. a pocos cm. Los resultados obtenidos son comunicados por el satélite al observador.

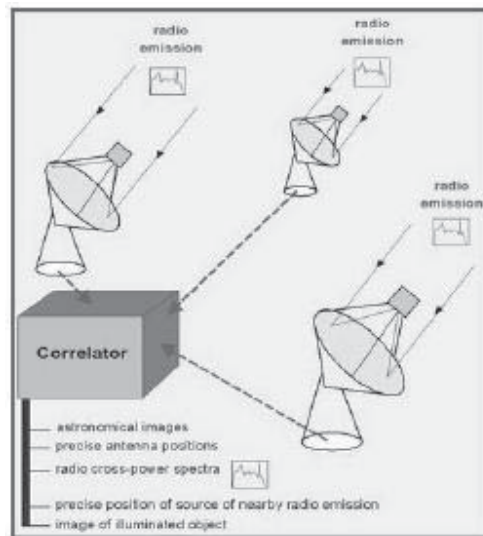
Las observaciones deben ser corregidas de errores instrumentales, de la influencia de la atmósfera y de las mareas oceánicas. Por consiguiente, si se es la distancia proporcionada por una de estas medidas y la órbita del satélite es conocida, la altitud  $h$  del satélite con respecto al elipsoide terrestre, nos permite obtener la diferencia  $N = h - a$ , que representa de manera aproximada la altura del geoide.

Medidas de este tipo han sido realizadas por el satélite GEOS 3, con una precisión del orden de  $\pm 0.5\text{m.}$ , mejoradas por el satélite SEASAT 1, con errores del orden de  $\pm 0.1\text{m.}$ , y por el satélite GEOSAT con una precisión de  $\pm 3\text{cm.}$

**5.2.5.- INTERFEROMETRÍA DE LARGA BASE (VLBI).**

La interferometría de muy larga base (VLBI) está plenamente operativa y constituye el más preciso de todos los sistemas de posicionamiento global. Este sistema permite medir el vector que une los centros radioeléctricos de dos radiotelescopios que podrían estar en la tierra hasta diametralmente opuestos.

Todos los métodos de posicionamiento por satélite pretenden fijar la posición de uno o más puntos sobre la superficie terrestre observando satélites con efemérides disponibles o estrellas de la propia galaxia. Pero si aumentamos la precisión estos puntos de referencia empiezan a mostrar indeterminaciones, por lo que se precisa un marco de referencia más lejano y estable, los cuásares (su posición es muy lejana, y emiten con intensidades aparentes hasta 100 veces superiores a la de una galaxia media).



Para la VLBI se usan la banda S (2 a 4 Ghz) y la X (8 a 12 Ghz). La técnica se practica con al menos dos radiotelescopios, que se orientan hacia un cuasar concreto. La señal recibida es referida a un patrón atómico local y registrada digitalmente en soporte magnético. Ambos registros se correlacionan, pudiendo determinarse en cada momento el retardo entre la llegada del frente plano de la señal a un radiotelescopio y al otro. Este retardo permite establecer la componente del vector que une ambas estaciones, en dirección de llegada de la señal. Se hacen múltiples determinaciones a diferentes cuasares.

La técnica VLBI arranca en 1977 cuando el servicio nacional de geodesia de EE.UU, tras los trabajos del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y del centro Goddard para Vuelos Espaciales, estableció tres observatorios para medidas exclusivamente geodésicas.

La NASA y el observatorio naval de USA se unieron pronto al proyecto que se denominó POLARIS (Polar Motion Analysis by Radio Interferometric Surveying). Desde 1984 la técnica se ha desarrollado y expandido por todo el mundo.

La VLBI tiene otra posibilidad de trabajo: la radiointerferometría entre elementos conectados (CERI), en la que se conectan ambos receptores trabajando en una base común de tiempos. Se han hecho trabajos en EE.UU y Gran Bretaña con conexiones por microondas. Estas técnicas permiten el establecimiento de una red mundial increíblemente precisa. Entre sus aplicaciones geofísicas cabe citar el control de derivas continentales a nivel centimétrico y la duración del día se establece con precisión de milisegundos.

#### 5.2.6.- MEDICIONES LASER A SATELITES (SLR).

El Satellite Laser Ranging (SLR) o Mediciones Láser a Satélites es un método muy preciso de medición de distancias realizado mediante la emisión de pulsos de Luz Láser a Satélites de acuerdo con el principio de pulso-eco.

El proceso consiste en enviar un muy corto y poderoso pulso (destello) de luz láser mediante un Telescopio Láser a los retrorreflectores de los satélites que se encuentran en órbitas de 300km a 40.000km de distancia de la superficie de la Tierra. Estos Retrorreflectores son "espejos" especiales con la capacidad de reflejar la luz en la misma dirección de incidencia. Entonces el haz de luz viaja hasta el satélite, y regresa hacia el receptor del telescopio.

Empleando un PET (Pico Event Timer), un reloj capaz medir intervalos de tiempo muy pequeños (pico-segundos), se mide el tiempo de vuelo del pulso láser en su viaje de ida y vuelta. Con este tiempo de vuelo y conocida la velocidad de la luz, es posible calcular la distancia entre el satélite y el telescopio.

Este proceso se repite a altas velocidades siguiendo la órbita del satélite durante el tiempo en que el satélite se encuentra dentro del rango de alcance del telescopio.

Este sistema provee mediciones instantáneas con un nivel de precisión milimétrico, las cuales pueden ser acumuladas con el fin de determinar de forma precisa las órbitas de los satélites medidos y así suministrar importantes datos científicos.

El sistema SLR se basa en la medición de la distancia en función del tiempo de tránsito de un haz láser. Los satélites, pasivos, son simples esferas recubiertas de prismas de reflexión total. También hay satélites mixtos multifunción utilizables en este sistema.

El instrumento de estación consta de un potente láser pulsante, un reloj atómico, un contador, un fotodetector, la óptica necesaria, un ordenador y la infraestructura mecánica de estacionamiento y puntería.

Conocida la orientación y posición aproximada de la estación y de las efemérides del satélite a observar, el ordenador calcula sus coordenadas topocéntricas locales para el momento de la observación y apunta el sistema óptico que agrupa el láser emisor y el telescopio receptor que conduce el retorno hasta el fotodetector.

El láser produce un pulso que es enviado al satélite, a la vez que se empieza a contar tiempo con el reloj atómico. Al llegar el retorno se detiene la cuenta. En función del tiempo de tránsito y la velocidad de la luz, se calcula la distancia. Las precisiones, que eran métricas en la primera generación han pasado a nivel de algunos centímetros.

Las estaciones SLR son estacionarias y conforman una red mundial de 25 estaciones. En EE.UU hay equipos móviles (MOBLAS) y portátiles (TLRS).

### **5.2.7.- TELEMETRÍA LASER SOBRE LA LUNA (LLR)**

El principio de esta técnica es la medición del tiempo de ida y vuelta de un pulso de luz LASER enviado desde una estación terrestre a alguno de cuatro retrorreflectores emplazados en la superficie lunar por las misiones Apollo (USA) y Lunakhod (URSS).

El LLR fue una técnica clave utilizada por el IERS, para conectar marcos de referencia. Se utilizaba para determinar la oblicuidad de la eclíptica, la orientación del marco dinámico del sistema solar en el marco de referencia extragaláctico, la nutación y precesión de largo período.

Varios centros de análisis tratan regularmente los datos de esta técnica.

◆ Distintos institutos de Alemania como son la Universidad Técnica de Munich, el Instituto para Geodesia Física y Astronómica, el Instituto de Geodesia Planetaria, etc, han trabajado con datos adquiridos de LLR desde 1970 hasta 1997. Se estimaron coordenadas de 5 sitios, posición baricéntrica y velocidad de la Tierra y de la Luna. Se estimaron y aplicaron correcciones a la precesión y a algunos términos de la nutación.

◆ El Jet Propulsion Laboratory (JPL). Realiza un ajuste global con el fin de obtener las coordenadas geocéntricas de estaciones, valores de rotación terrestres, los parámetros de la órbita de la Luna, y las posiciones de los 4 reflectores sobre la Luna. Se han realizado mediciones desde los observatorios de Mc.Donald, Grasse (OCA/CERGA) y Hakeakala.

◆ El Centre d'Estudes et Recherches de Geodynamique et Astrometrie (CERGA) Francia, participa en el programa EROLD. Actualmente la estación es conocida como OCA/CERGA LLR.

## CAPITULO 6.- SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACION POR SATÉLITE (GNSS)

### 6.1.- DEFINICION.

Un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS en su acrónimo inglés) es una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea por tierra, mar o aire. Estos permiten determinar las coordenadas geográficas de un punto dado como resultado de la recepción de señales provenientes de constelaciones de satélites artificiales de la Tierra para fines de navegación, transporte, geodésicos, hidrográficos, agrícolas, gaseosa y otras actividades afines.

Un sistema de navegación basado en satélites artificiales puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora (cuatro dimensiones) con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas.

### 6.2.- ANTECEDENTES.

Un temprano precursor de los Sistema de navegación por satélite fueron los sistemas terrestres de LORAN y de Omega, que utilizaron los radiotransmisores de baja frecuencia (100 khz) terrestres en vez de los satélites. Estos sistemas difundían un pulso de radio desde una localización "maestra" conocida, seguido por pulsos repetidos desde un número de estaciones "esclavas". El retraso entre la recepción y el envío de la señal en las estaciones auxiliares era controlado, permitiendo a los receptores comparar el retraso entre la recepción y el retraso entre enviados. A través de este método se puede conocer la distancia a cada uno de las estaciones auxiliares.

El primer sistema de navegación por satélites fue el Transit, un sistema desplegado por el ejército de Estados Unidos en los años 1960. Transit se basaba en el efecto Doppler, los satélites viajan en trayectorias conocidas y difunden sus señales en una frecuencia conocida. La frecuencia recibida se diferencia levemente de la frecuencia difundida debido al movimiento del satélite con respecto al receptor. Monitorizando este cambio de frecuencia a intervalos cortos, el receptor puede determinar su localización a un lado o al otro del satélite, la combinación de varias de estas medidas, unido a un conocimiento exacto de la órbita del satélite pueden fijar una posición concreta.

### 6.3.- TEORIA Y CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES.

La radionavegación por satélite se basa en el cálculo de una posición midiendo las distancias de un mínimo de tres satélites de posición conocida. La precisión de las mediciones de distancia determina la exactitud de la ubicación final. En la práctica, un receptor capta las señales de sincronización emitida por los satélites que contiene la posición del satélite y el tiempo exacto en que esta fue transmitida. La posición del satélite se transmite en un mensaje de datos que se superpone en un código que sirve como referencia de la sincronización.

La precisión de la posición depende de la exactitud de la información de tiempo. Sólo los cronómetros atómicos proveen la precisión requerida, del orden de nanosegundos ( $10^{-9}$  s). Para ello el satélite utiliza un reloj atómico para estar sincronizado con todos los satélites en la constelación. El receptor compara el tiempo de la difusión, que está codificada en la transmisión,

con el tiempo de la recepción, medida por un reloj interno, de forma que se mide el "tiempo de vuelo" de la señal desde el satélite. Estos cronómetros constituyen un elemento tecnológico fundamental a bordo de los satélites que conforman las constelaciones GNSS y pueden contribuir a definir patrones de tiempo internacionales. La sincronización se mejorará con la inclusión de la señal emitida por un cuarto satélite. En el diseño de la constelación de satélites se presta atención especial a la selección del número de estos y a sus órbitas para que siempre estén visibles en cantidad suficiente desde cualquier lugar del mundo y así asegurar la disponibilidad de señal y la precisión.

Cada medida de la distancia, coloca al receptor en una cáscara esférica de radio la distancia medida. Tomando varias medidas y después buscando el punto donde se cortan, se obtiene la posición. Sin embargo, en el caso de un receptor móvil que se desplaza rápidamente, la posición de la señal se mueve mientras que las señales de varios satélites son recibidas. Además, las señales de radio se retardan levemente cuando pasan a través de la ionosfera. El cálculo básico procura encontrar la línea tangente más corta a cuatro cáscaras esféricas centradas en cuatro satélites. Los receptores de navegación por satélite reducen los errores usando combinaciones de señales de múltiples satélites y correlaciones múltiples, utilizando entonces técnicas como filtros de Kalman para combinar los datos parciales, afectados por ruido y en constante cambio, en una sola estimación de posición, tiempo, y velocidad.

#### **6.4.- APLICACIONES DE LOS SISTEMAS GNSS.**

El guiado de precisión hasta el objetivo de misiles y bombas inteligentes es uno de los usos militares de los GNSS.

#### **USO MILITAR**

El origen de la navegación por satélite fue militar. La navegación por satélite permite alcanzar una precisión que no se había conseguido hasta este momento, en los objetivos de las armas, aumentando su efectividad, y reduciendo daños no deseados mediante armamento que se vale de la señal de los GNSS que sí producían las armas convencionales. La navegación por satélite también permite que las tropas sean dirigidas y se localicen fácilmente.

En suma se puede considerar un factor multiplicador de la fuerza. Particularmente, la capacidad de reducir muertes involuntarias tiene ventajas particulares en las guerras luchadas por las democracias, donde la opinión pública tiene una gran influencia en la guerra. Por esta razón, un sistema de navegación por satélite es un factor esencial para cualquier potencia militar.

#### **NAVEGACION AEREA**

La navegación aérea utiliza, dentro del concepto de Sistemas Globales de Navegación por Satélites (GNSS) implementado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), a los sistemas de posicionamiento, reconociéndose como un elemento clave en los sistemas de Comunicaciones, Navegación y Vigilancia que apoyan el control del tráfico aéreo (CNS/ATM), así como un fundamento sobre el cual los estados pueden suministrar servicios de navegación aeronáutica mejorados. Los estados que autorizan operaciones GNSS son los responsables de determinar si el mismo satisface los requisitos de actuación requeridos para esta actividad (de acuerdo a lo especificado por la OACI) en el espacio aéreo de su competencia y de notificar a los usuarios cuando dicha actuación no cumple con los estos.

Por concepto, el GNSS es un sistema mundial de determinación de la posición y la hora, que incluye constelaciones principales de satélites, receptores de aeronave, supervisión de integridad del sistema, y sistemas de aumentación que mejoran la actuación de las constelaciones centrales.

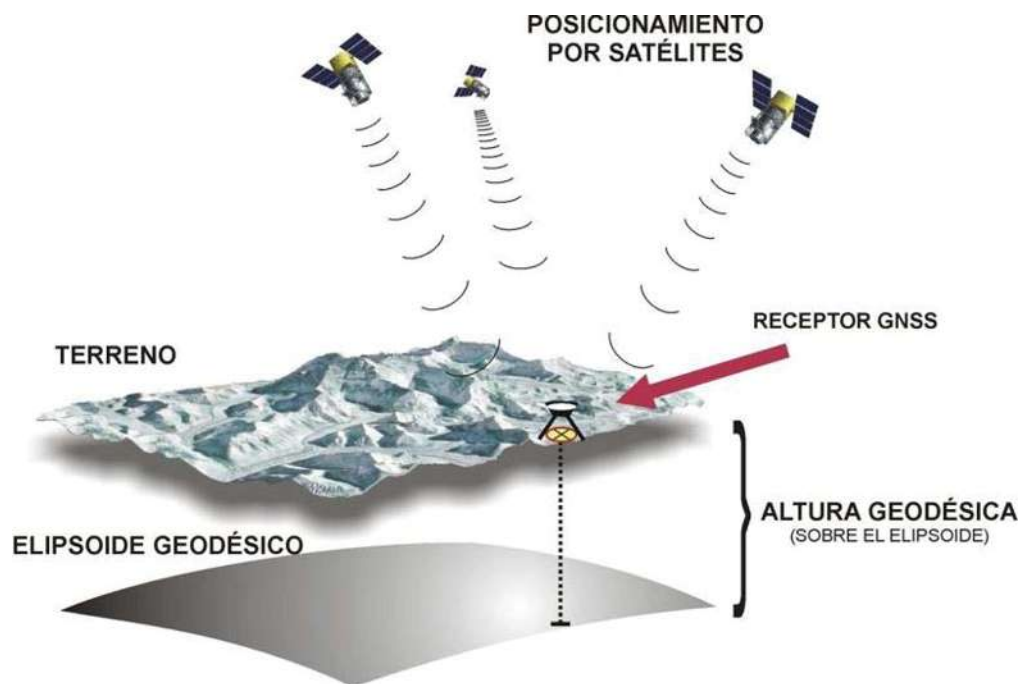
En síntesis, el GNSS es un término general que comprende a todos los sistemas de navegación por satélites, los que ya han sido implementados (GPS, GLONASS) y los que están en desarrollo (Galileo), proponiendo la utilización de satélites como soporte a la navegación, ofreciendo localización precisa de las aeronaves y cobertura en todo el globo terrestre. Se está implantando el GNSS de una manera evolutiva a medida que esté preparado para acoger el gran volumen de tráfico aéreo civil existente en la actualidad, y pueda responder a las necesidades de seguridad que requiere el sector, uno de los más exigentes del mundo.

Cuando el sistema GNSS esté completamente desarrollado, se prevé que pueda ser utilizado sin requerir ayuda de cualquier otro sistema de navegación convencional, desde el despegue hasta completar un aterrizaje de precisión Categoría I, II ó III, es decir, en todas las fases de vuelo.

### **GNSS Y SU RELACIÓN CON EL GEOIDE.**

La tendencia a la baja de precios en software y hardware de los sistemas de navegación por satélite ha convertido a los GNSS en la mejor alternativa de posicionamiento global y en la actualidad el público en general realiza un uso cotidiano de las constelaciones de satélites con el fin de obtener coordenadas latitud ( $\varphi$ ), longitud ( $\lambda$ ) y altura geodésica ( $h$ ), relativas a un elipsoide geodésico de referencia.

El parámetro  $h$  definido como la distancia vertical desde un punto de la superficie terrestre al elipsoide de referencia, determina un dato de altura o elevación para cada lugar sobre el terreno. Sin embargo, la altura geodésica obtenida a partir de observaciones con equipos receptores de señal GNSS, carece de sentido físico para ser considerada como referencia o parámetro de elevación y por lo general es desechada ya que en la práctica, cuando se asocian datos de elevación a la información geográfica se prefiere utilizar la altura sobre el nivel medio del mar o altura ortométrica.



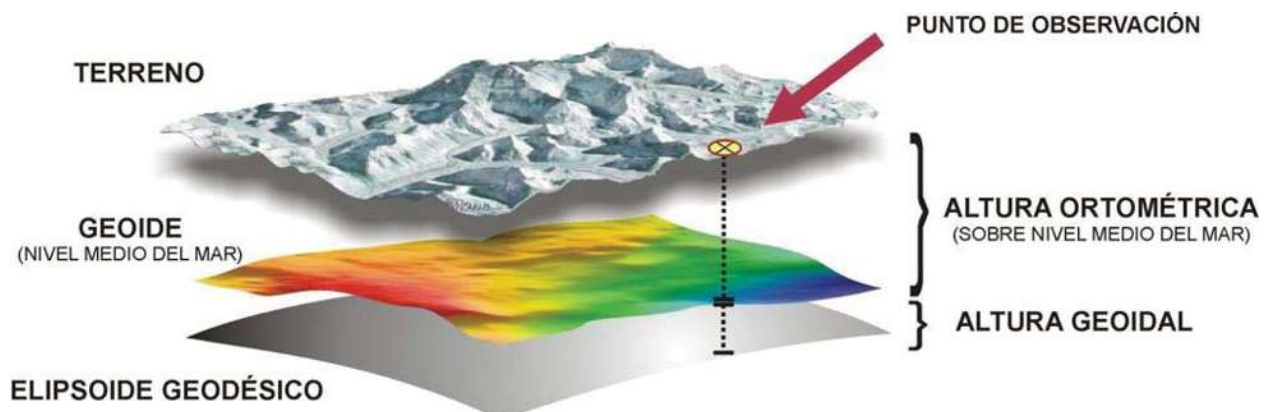
Sin embargo existe una manera sencilla de transformar el valor de altura geodésica que proporciona un receptor GNSS en altura ortométrica, y eso se logra si se cuenta con el valor de altura geoidal correspondiente al punto de interés.

Método de transformación:

Sea  $H$  el valor en metros de altura ortométrica, para un punto sobre el terreno,  $h$  el valor de altura geodésica y  $N$  la altura geoidal correspondiente al mismo punto, entonces se aplica la siguiente ecuación:

$$H = h - N$$

La relación se ilustra en la figura siguiente:



Este procedimiento se traduce en una disminución de costos y tiempo para los usuarios de GNSS, en la obtención de alturas ortométricas sin tener necesidad de acudir a las costosas técnicas topográficas de nivelación diferencial para propósitos cartográficos.

### **OTROS USOS CIVILES.**

Algunas de las aplicaciones civiles donde se utiliza las señales GNSS son las siguientes:

- Ayudas a la navegación y orientación en dispositivos de mano para senderismo, dispositivos integrados en los automóviles, camiones, barcos, etc.
- Sincronización.
- Sistemas de localización para emergencias.
- Geomática.
- Seguimiento de los dispositivos usados en la fauna.

### **6.5.- SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATELITES ACTUALES**

Actualmente, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos de América y el Sistema Orbital Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS) de la Federación Rusa forman parte del concepto GNSS.

#### **6.5.1.- NAVSTAR GPS**

El NAVSTAR-GPS (NAVigation System and Ranging - Global Position System) conocido simplemente como GPS, es un sistema de radionavegación basado en satélites que utiliza mediciones de distancia precisas de satélites GPS para determinar la posición (el GPS posee un error nominal en el cálculo de la posición de aproximadamente 15 m) y la hora en cualquier parte del mundo. El sistema es operado para el Gobierno de los Estados Unidos por su Departamento de Defensa y es el único sistema de navegación por satélite completamente operativo a fecha actual.

El sistema está formado por una constelación de 24 a 27 satélites que se muevan en órbita a 20.000 km aproximadamente alrededor de seis planos con una inclinación de 55 grados. El número exacto de satélites varía en función de los satélites que se retiran cuando ha transcurrido su vida útil.

Hoy por hoy la constelación NAVSTAR-GPS es la única con cobertura mundial. En el capítulo siguiente se abordará el tema con más amplitud.

#### **6.5.2.- SISTEMA GLONASS.**

La contrapartida rusa al GPS lleva el nombre Global Navigation Satellite System (GLONASS) y es operacional desde el 18 de Enero de 1996, día en el que los 24 satélites estaban operativos y en comunicación al mismo tiempo. Kazantsev (1992) discutió el estatuto de GLONASS. Actualmente, tras varios esfuerzos se ha conseguido construir receptores que puedan recibir señales pertenecientes a los dos grupos de satélites GLONASS y GPS. Existe por supuesto un gran interés en incorporar los satélites GLONASS al sistema debido al incremento potencial del número de satélites visibles simultáneamente. Como ha sido destacado anteriormente, cuanto mayor es la cantidad de satélites disponibles al mismo tiempo, más rápidas, mejor y más fiables son las técnicas de posicionamiento. Hoy en día las expectativas se centran en un nuevo sistema de gran interés: el GNSS (Global Navigation Satellite System) integrado por los dos grandes sistemas.

El Sistema Mundial de Navegación por Satélites (GLONASS) proporciona determinaciones tridimensionales de posición y velocidad basadas en las mediciones del tiempo de tránsito y de desviación Doppler de las señales de Radio frecuencia (RF) transmitidas por los satélites

GLONASS. El sistema es operado por el Ministerio de Defensa de la Federación de Rusia y ha sido utilizado como reserva por algunos receptores comerciales del GPS.

Tras la desmembración de la Unión Soviética y la falta de recursos el sistema perdió operatividad al no reemplazarse los satélites. En la actualidad el gobierno ruso espera que la constelación GLONASS vuelva a estar operativa completamente antes de 2010.

A principios de los 70s, quizá como una respuesta al desarrollo del Sistema GPS, el antiguo Ministro de Defensa Soviético desarrolló el Global' naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema o Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS). El Sistema GLONASS es similar al GPS en muchos aspectos, aunque como se verá también hay muchas diferencias.

En el año 1993, oficialmente el Gobierno Ruso colocó el programa GLONASS en manos de las Fuerzas Espaciales Militares Rusas (RSF). Este organismo es el responsable del desarrollo de satélites GLONASS, de su mantenimiento y puesta en órbita, y certificación a los usuarios. Este organismo opera en colaboración con el CSIC (Coordinational Scientific Information Center), el cual publica la información sobre GLONASS.

Durante los 80s, la información acerca de GLONASS era escasa. No se sabía mucho de las órbitas de los satélites ni de las señales usadas para transmisión de las señales de navegación. Pero actualmente, gracias a estudios e investigaciones sobre este sistema, se dispone ya de gran cantidad de información acerca de GLONASS. Los rusos, a través del RSF y del CSIC publican el documento ICD (Interface Control Document). Este documento es similar en estructura al Segmento Espacial del sistema NAVSTAR GPS, donde se describe el sistema, sus componentes, estructura de la señal y el mensaje de navegación para uso civil.

La constelación ha experimentado un gran progreso desde los años 1994 y 1995. Los planes de GLONASS son ofrecer dos niveles de servicio:

- El **Channel of Standard Accuracy (CSA)**, similar al Standard Positioning Service (SPS) del Sistema GPS, disponible para uso civil.
- El **Channel of High Accuracy (CHA)**, similar al Precise Positioning Service (PPS) del Sistema GPS, disponible solo para usuarios autorizados.

La Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO) aceptó formalmente en Julio 1996, el uso de GLONASS/CSA para uso en aviación civil, como ya se hizo en 1994 con el GPS/SPS.

### **DESCRIPCIÓN Y CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.**

El Sistema GLONASS, al igual que el Sistema GPS, está formado por tres sectores fundamentales: el *Sector de Control*, el *Sector Espacial* y el *Sector Usuario*.

#### **SECTOR DE CONTROL.**

El Sector de Control está formado por un Sistema Central de Control (SCC) en la región de Moscú (Golitsyno-2) y una red de estaciones de seguimiento y control (Command Tracking Stations, CTS), emplazadas por todo el área alrededor de Rusia. El Sector de Control GLONASS, al igual que el de GPS debe seguir y vigilar el estado de sus satélites, determinar las efemérides y errores de los relojes de los satélites, es decir, la diferencia entre el tiempo GLONASS y la escala de tiempo

UTC(SU). Además también deben actualizar los datos de navegación de los satélites. Estas actualizaciones se realizan dos veces al día.

Las estaciones de control (CTSs) realizan el seguimiento de los satélites y almacenan los datos de distancias y telemetría a partir de las señales de los satélites. La información obtenida en las CTSs es procesada en el Sistema Central de Control (SCC) para determinar los estados de las órbitas y relojes de los satélites, y para actualizar el mensaje de navegación de cada satélite. Esta información es enviada a cada satélite por medio de las CTSs. Las CTSs calibran periódicamente los datos de distancias a los satélites mediante láser. Para ello, los satélites GLONASS van provistos de unos reflectores especiales.

La sincronización de todos estos procesos en el Sistema GLONASS es muy importante. Para conseguir esta sincronización, se dispone de un reloj atómico de hidrógeno de alta precisión, el cual determina la escala de tiempo GLONASS. Los satélites GLONASS llevan a bordo un reloj de cesio y se sincronizan respecto a la State Etalon UTC(CIS) en Mendeleevo, a través de la escala de tiempo del sistema GLONASS.

A todas estas estaciones de control debemos añadir otras estaciones de seguimiento que se utilizan para obtener los parámetros de transformación del Sistema GLONASS PZ-90 al Sistema GPS WGS-84, además de la determinación de las órbitas y observación y análisis de las anomalías de los satélites. Estos parámetros de transformación se aplican cuando se trabaja con el sistema combinado GPS/GLONASS. Estas estaciones están repartidas por todo el mundo y utilizan técnicas láser, radar y ópticas. Estos parámetros son calculados por mínimos cuadrados utilizando 9 días de datos de seguimiento.

La calidad de las posiciones estimadas obtenidas a partir de GLONASS es comparable a la que se obtiene con GPS cuando la Disponibilidad Selectiva está desactivada. El valor del rms (URE) en la determinación de las órbitas para GLONASS es de aproximadamente 10 m.

El Gobierno de la Federación Rusa ha declarado que GLONASS proporcionará a los usuarios civiles una precisión en toda la Tierra para el posicionamiento absoluto en tiempo real basado en medidas de código de unos 60 m en horizontal (99.7%) y de unos 75 m en vertical (99.7%). Los rusos han anunciado que no tienen previsto introducir ninguna medida intencionada de degradación de la precisión del sistema.

Las estaciones de control de las Fuerzas Espaciales Rusas (RSF) publican unos boletines, llamados NAGUSs para los usuarios GLONASS con noticias, estado y anomalías del sistema, para así anunciar la inutilidad de alguno o varios satélites. Otras organizaciones, como GLONASS Group del Laboratorio de Lincoln de Massachusetts o el DLR-DFD Neustrelitz Remote Sensing Ground Station en Alemania, también controlan la actividad de GLONASS.

Las anomalías se producen cuando los parámetros que manda el satélite en su mensaje de navegación son incorrectos y el parámetro de salud indica que está sano. El resultado es una incorrecta pseudo distancia y trae consigo posicionamientos incorrectos. Las anomalías del sistema se determinan por medio de las estaciones de control, que hacen uso del algoritmo RAIM. Esto

consiste en receptores autónomos de seguimiento íntegro que detectan anomalías en la transmisión de datos, aún firmando un buen estado de salud en los mensajes de navegación y almanques. Además, si un receptor dispone de este algoritmo RAIM puede detectar fácilmente estas anomalías.

### SECTOR ESPACIAL.

El Sector Espacial está formado por la constelación de satélites. La constelación completa se compone 24 satélites en tres planos orbitales, cuyo nodo ascendente es de  $120^\circ$  y argumento de latitud de  $15^\circ$ . Cada plano contiene 8 satélites espaciados regularmente, con argumento de latitud de  $45^\circ$ . Los planos están inclinados  $64,8^\circ$  respecto al Ecuador. Los satélites GLONASS se encuentran a una distancia de aproximadamente 19100 Km y se sitúan en órbitas casi circulares con semieje mayor de aproximadamente 25510 Km, siendo el periodo orbital de 675,8 minutos, es decir, 11 horas y 15 minutos. Esto garantiza, con la constelación completa, la visibilidad de un mínimo de 5 satélites en todo el mundo con adecuada geometría, es decir, la constelación GLONASS proporciona una cobertura de navegación continua y global para la ejecución satisfactoria de observaciones de navegación. Cada satélite transmite una señal de navegación de radiofrecuencia, conteniendo un mensaje de navegación para los usuarios.

Los planos se numeran del 1 al 3. Cada satélite, según el plano en el que esté, 1, 2 ó 3, se numera del 1 al 8, del 9 al 16 y del 17 al 24 respectivamente.

El primer satélite se lanzó el 12 de Octubre de 1982, y el último el 14 de Diciembre de 1995. En este periodo de tiempo se han realizado un total de 27 lanzamientos (dos de ellos fallidos con fecha 24-4-1987 y 17-2-1988), poniendo en órbita un total de 73 satélites, de los cuales a fecha de Enero de 1998, sólo 13 están actualmente operativos, más uno de repuesto. La distribución de los satélites en sus planos viene dada por la siguiente tabla:

**TABLA 1.** Planos, satélites y canales.

| <b>Plano 1</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Satélite       | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 |
| Canal          | -  | -  | 21 | 12 | -  | 13 | -  | -  |
| <b>Plano 2</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Satélite       | 09 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Canal          | 06 | 09 | 04 | 22 | 06 | -  | 04 | 22 |
| <b>Plano 3</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Satélite       | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Canal          | 24 | -  | -  | 01 | -  | 10 | -  | -  |

Cada satélite GLONASS dispone de un pequeño reflector, que es usado para el seguimiento de los satélites por láser desde las estaciones de control. Existen 4 prototipos o modelos de satélite. El primer prototipo lo componen un total de 10 satélites que forman el Bloque I, lanzados entre Octubre-82 y May-85. Otros 6 satélites del segundo prototipo forman el Bloque IIa, lanzados entre Mayo-85 y Septiembre-86. Un total de 12 satélites forman el Bloque IIb del tercer prototipo, lanzados entre Abril-87 y Mayo-88, de los cuales seis se perdieron en los dos fallos anteriormente reseñados por fallo del vehículo de lanzamiento. El cuarto prototipo forma el Bloque IIv,

constituido por 43 satélites, de los cuales se han lanzado la totalidad de ellos hasta la fecha de 14 de Diciembre de 1995.

Cada subsiguiente generación de satélites contiene equipamientos más modernos y tienen un mayor periodo de vida. El Gobierno Ruso desarrolla un nuevo prototipo de satélites que irán sustituyendo a los antiguos para formar la nueva Constelación GLONASS-M. Los test con los satélites GLONASS-M comenzaron en 1996. Las principales características de la Constelación GLONASS-M son:

- la esperanza de vida de los satélites será de 5 años, frente a los 3 años de los satélites actuales.
  - transmisión del código C/A en L2 para uso civil.
  - estabilidad en los relojes de  $1 \cdot 10^{-13}$  s frente a la actual de  $5 \cdot 10^{-13}$  s.
  - mejora de las precisiones de las efemérides.
- capacidad del Sector de Control para establecer la mala salud de los satélites a los 10s de producirse el fallo.
  - transmisión instantánea del desfase entre las escalas de tiempo GPS y GLONASS.
  - reducción del rms (URE) a 5 m frente al valor actual de 10 m.

#### CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES GLONASS.

Las descripciones de las señales GLONASS se refleja en los documentos ICD. Los satélites GLONASS transmiten dos señales de ruido pseudoaleatorio. Los satélites GLONASS llevan a bordo relojes de atómicos de Cesio con un oscilador de frecuencia fundamental de 5 MHz. A partir de esta frecuencia fundamental se pueden obtener o modular los códigos C/A y P, de frecuencias 0.511 MHz y 5.11 MHz respectivamente. En la señal también se introduce un mensaje de 50 bits por segundo. La **banda L1** funciona en la frecuencia  $1602 + 0.5625 \cdot k$  MHz, donde k es el canal (0-24), lo genera un rango de frecuencias que van desde 1602 - 1615.5 MHz. La **banda L2** funciona en la frecuencia  $1246 + 0.4375 \cdot k$  MHz, lo que genera un rango de frecuencias que van desde 1246 - 1256.5 MHz.

Algunas transmisiones GLONASS crean interferencias con las señales astronómicas de radio, que usan las bandas de frecuencia de 1610.6 - 1613.8 y 1660 - 1670 MHz, que corresponden a los canales GLONASS del 15 al 20. Además, las transmisiones GLONASS de frecuencias superiores 1610 MHz tienen interferencias con las señales del servicio de satélites para comunicaciones móviles en las frecuencias que van desde 1610 - 1626.5 MHz. Para solucionar esto, y por la necesidad de minimizar las interferencias, las autoridades encargadas del Sistema GLONASS decidieron reducir el número de frecuencias usadas (y por lo tanto el número de canales), y bajar el intervalo de frecuencias utilizadas. Así, el sistema constará de 12 canales de frecuencia, más dos adicionales para los test de control. De esta forma la **banda L1** se encontrará entre 1598.0625 - 1604.25 MHz y la **banda L2** se encontrará entre 1242.9375 - 1247.75 MHz. Los actuales y futuros canales de frecuencias GLONASS se pueden resumir de la forma siguiente:

\* **Frecuencias iniciales:**  $f_{L1} = 1602 + 0.5625 \cdot k$  MHz ( $k = 0, \dots, 24$ )  
 $f_{L2} = 1246 + 0.4375 \cdot k$  MHz ( $k = 0, \dots, 24$ )

\* **Hoy y hasta 1998:** 1602 - 1608.8 MHz (canales 1 - 12)

1614.4 - 1615.5MHz (canales 22 - 24)

1246 - 1251.25 MHz (canales 1 - 12)  
1255.625 - 1256.5 MHz (canales 22 - 24)

Los canales 15-20 no están en uso y el ICD estipula el uso de los canales de frecuencia 13, 14, y 21 en circunstancias excepcionales.

**\* 1998-2005:** 1602 - 1608.8 MHz (canales 0 - 12)

1246 - 1251.25 MHz (canales 0 - 12)

**\* A partir de 2005:** 1598.1 - 1604.25 MHz (canales -7 - 4)

1242.9375 - 1247.75 MHz (canales -7 - 4)

Los canales 5 y 6 serán utilizados para pruebas de control.

Pero la cuestión que se plantea es cómo introducir los 24 satélites de la constelación completa en sólo 12 canales. Lo que se plantea es introducir dos satélites antipodales de un mismo plano en el mismo canal, esto es, satélites separados 180° de argumento de latitud, de forma que un usuario colocado en cualquier punto de la Tierra nunca recibirá señales simultáneas de los dos satélites situados en el mismo canal.

GLONASS transmite el código P en ambas bandas L1 y L2 y el código C/A, de momento sólo en la banda L1, pero está programado que la Constelación GLONASS-M lo transmita también en la banda L2 para uso civil.

El código C/A tiene una longitud de 511 chips y se propaga con una velocidad de 511 Kchips/s y por lo tanto con una repetibilidad de 1 mili segundo. El código P tiene una longitud de  $5.11 \cdot 10^6$  chips y se propaga con una velocidad de 5.11 Mchips/s, cuya repetibilidad es de 1 segundo. A diferencia de los satélites GPS, **todos los satélites GLONASS transmiten los mismos códigos**. Esto es así porque en GLONASS la identificación de los satélites se hace por la frecuencia de las portadoras y no por el PRN de los códigos como se hace en GPS.

Los errores que se pueden cometer en el posicionamiento absoluto de un punto con el código C/A utilizando el Sistema GLONASS son de unos 60 m (99.7%) en horizontal y de unos 75 m (99.7%) en vertical. Esta precisión es comparable a la que ofrece el Sistema GPS sin la Disponibilidad Selectiva.

#### **MENSAJE DE NAVEGACIÓN.**

El mensaje de navegación se transmite con una velocidad de 50 bit/s y se modula junto con los códigos C/A y P. El mensaje de navegación GLONASS del código C/A divide los datos en datos operacionales o inmediatos y datos no operacionales o no inmediatos. Los **datos operacionales** son las efemérides, los parámetros de reloj y época del reloj del satélite. Las efemérides de los satélites

se dan en términos de posición, velocidad, y vector de aceleración de la época de referencia. Los **datos no operacionales** comprenden el almanaque (o efemérides aproximadas) de la constelación, junto con los estados de salud de todos los satélites GLONASS. Los datos de salud de los satélites no tienen tiempo de actualización. Además, en los datos no operacionales hay un parámetro que indica la diferencia entre el sistema de tiempo GLONASS y el UTC, parámetro llamado  $\delta$ . Estos datos se determinan para el comienzo de cada día.

Los parámetros de efemérides son generalmente cargados en cada satélite una vez al día, junto con el parámetro  $\delta$ . El tiempo desde la última grabación o actualización de los datos del mensaje se determina por un parámetro  $E_n$ , que determina la edad de las efemérides en días. Los parámetros de reloj son grabados dos veces al día. El mensaje completo tiene una duración de 2 min. y 30 seg., pero las efemérides y la información de reloj se repite cada 30 seg.

Las autoridades GLONASS no han publicado hasta ahora los contenidos del mensaje de navegación del código P. Sin embargo, se sabe que el mensaje completo dura 12 min. y que las efemérides y la información de reloj se repite cada 10 seg.

El Sistema GLONASS dispone de un sistema de tiempos y de un sistema de referencia propio y distinto al de GPS. El tiempo GLONASS está referido al UTC (SU). El UTC (SU) se diferencia en unos microsegundos al UTC (BIPM). El NTFS (National Time and Frequency Service) se encarga de que el desfase sea de un microsegundo o menos. Para ello, en determinadas ocasiones se introduce un salto de unos segundos, a diferencia del tiempo GPS que no requiere de estos saltos.

#### SISTEMA DE REFERENCIA. DATUM PZ-90.

Las efemérides GLONASS están referidas al Datum Geodésico Parametry Zemli 1990 o PZ-90, o en su traducción Parámetros de la Tierra 1990 o PE-90. Este sistema reemplazó al SGS-85, usado por GLONASS hasta 1993.

El sistema PZ-90 es un sistema de referencia terrestre con coordenadas definidas de la misma forma que el Sistema de Referencia Internacional Terrestre (ITRF). Las constantes y parámetros del PZ-90 se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA 2.** Parámetros del Datum PZ-90

| Parámetro                                | Valor                                                 |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Rotación de la Tierra                    | $72.92115 \cdot 10^{-6}$ rad/s                        |
| Constante Gravitacional                  | $398600.44 \cdot 10^9$ m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> |
| Constante Gravitacional de la atmósfera  | $0.35 \cdot 10^9$ m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>      |
| Velocidad de la luz                      | 299792458 m/s                                         |
| Semieje mayor del elipsoide              | 6378136 m                                             |
| Aplanamiento del elipsoide               | 1 / 298.257839303                                     |
| Aceleración de la gravedad en el Ecuador | 978032.8 mgal                                         |

La realización del Sistema PZ-90 por medio de la adopción de coordenadas de estaciones de referencia ha dado como resultado el desfase en el origen y orientación de los ejes, así como la diferencia en escala con respecto al ITRF y al Sistema WGS-84 también.

### **SECTOR USUARIO.**

El Sistema GLONASS es un sistema militar y civil. Todos los usuarios militares y civiles constituyen el Sector Usuario. El desarrollo y diseño de nuevos receptores por parte de los fabricantes está en continua evolución.

Un equipo de recepción de señales GLONASS, al igual que uno de GPS, está formado por una antena y un receptor. La antena suele llevar un plano de tierra para evitar el efecto multipath, es decir, la recepción de señales reflejadas en el suelo u otros objetos, que empeoran la precisión. Los receptores disponen de un reloj para sincronizar las señales recibidas.

Existen dos generaciones de receptores GLONASS. La primera generación contenían 1,2 y 4 canales. La segunda generación son ya mucho más compactos y ligeros, incluyendo 5, 6 y 12 canales, usados para aplicaciones civiles y capaces de operar con las dos constelaciones GPS/GLONASS.

Fuera de Rusia, hay un número considerable de fabricantes e investigadores que han diseñado y construido receptores GLONASS o GPS/GLONASS incluyendo doble frecuencia y códigos C/A y P. Algunos de ellos eran prototipos desarrollados para ganar experiencia con GLONASS, y otros para aplicaciones específicas.

Entre las principales marcas de los receptores GLONASS o GPS/GLONASS se encuentran:

- GEOTRACER 2404: 12 canales GPS y 12 canales GLONASS.
- Magnavox: 8 canales GLONASS.
- 3S Navigation: 12 canales GNSS para navegación.
- GG-24 Astech: 12 canales GPS y 12 canales GLONASS.
- Sercel Scorpio 6001: 16 canales GPS/GLONASS.

### **6.6.- SISTEMA DE POSICIONAMIENTO POR SATELITES EN PROYECTO**

Actualmente varios países intentan desarrollar sistemas propios, tal es el caso de China, Japón, India, Francia o Europa.

#### **6.6.1.- SISTEMA EUROPEO GALILEO**

Galileo es un sistema de navegación por satélite (GNSS) y es la iniciativa de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea que acordaron desarrollar un sistema de radionavegación por satélite de última generación y de alcance mundial propio, que brindara un servicio de ubicación en el espacio preciso y garantizado, bajo control civil.

Galileo comprende una constelación de 30 satélites divididos en tres órbitas circulares, a una altitud de aproximadamente 24.000 Km, que cubren toda la superficie del planeta. Éstos estarán apoyados por una red mundial de estaciones terrestres. El primer satélite fue lanzado el 28 de diciembre de 2005 y se espera que el sistema esté completamente operativo a partir de 2010 (dos años más tarde

de lo inicialmente previstos). Galileo será compatible con la próxima generación de NAVSTAR-GPS que estará operativa antes del 2012. Los receptores podrán combinar las señales de 30 satélites de Galileo y 28 del GPS, aumentando la precisión de las medidas. El segundo de los satélites de prueba, el Giove-B debería haberse lanzado en abril de 2006, pero por problemas con el ordenador de a bordo el lanzamiento fue retrasado hasta el pasado 25 de abril de 2008, teniendo lugar desde el mismo cosmódromo.

Inicialmente Galileo iba a estar disponible en el 2008 aunque el proyecto acumula ya tres años de retraso y no podrá comercializar sus primeros servicios hasta 2011, entre temores de que esa fecha pueda demorarse hasta 2014, entre otros motivos, por disensiones entre los países participantes.

### **CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

El sistema Galileo estará formado por una constelación mundial de 30 satélites en órbita terrestre media distribuidos en tres planos inclinados con un ángulo de  $56^\circ$  hacia el ecuador, a 23.616 km de altitud. Se van a distribuir diez satélites alrededor de cada plano y cada uno tardará 14 horas para completar la órbita de la Tierra. Cada plano tiene un satélite de reserva activo, capaz de reemplazar a cualquier satélite que falle en ese plano.

Los satélites emplearán tecnologías de gran fiabilidad a la vez que innovadoras. El cuerpo rotará sobre el eje que mira a la Tierra para que sus paneles solares roten y apunten al Sol (generando un pico de energía de 1,5 Kw.). Después de que se establezca la constelación inicial, los demás satélites que se lancen reemplazarán a los dañados y completarán el sistema a medida que la vida útil de los satélites originales se extinga.

Dos centros de control Galileo, ubicados en Europa, controlarán la constelación y la sincronización de los cronómetros atómicos del satélite, el procesamiento de señales de integridad y el manejo de datos de todos los elementos internos y externos. Una red de comunicaciones dedicada de alcance mundial interconectará todas las estaciones y las instalaciones terrestres mediante enlaces terrestres y satelitales (VSAT).

La transferencia de datos con los satélites se realizará a través de una red mundial de estaciones Galileo de enlace ascendente, cada una de las cuales tendrá estaciones de telemetría, telecomunicaciones, seguimiento de satélites y de transmisión de la información de misión. Las estaciones de monitoreo de GALILEO de todo el planeta controlarán la calidad de la señal. La información obtenida de estas estaciones se transmite por la red de comunicaciones a los dos centros de control terrestres.

Los componentes regionales proveerán, de forma independiente, la integridad de las señales de Galileo. Los prestadores de servicios regionales difundirán los datos de integridad regionales usando los canales de enlace ascendente autorizados provistos por el sistema. Se garantizará que los usuarios siempre reciban datos de integridad a través de dos satélites con un ángulo mínimo de elevación de  $25^\circ$ .

Los componentes locales mejorarán las prestaciones mencionadas anteriormente con distribución de datos locales por medio de radioenlaces terrestres o redes de comunicación existentes a fin de aumentar la precisión o la integridad alrededor de aeropuertos, puertos cabeza de líneas ferroviarias y en áreas urbanas. Los componentes locales también se desplegarán para ampliar los servicios de radionavegación a los usuarios situados dentro de edificios

**SERVICIOS.**

Galileo está concebido para usuarios multimodales. A fin de responder a las diferentes necesidades, el sistema proveerá cinco servicios.

**Servicio abierto (Open Service – OS)**

Orientado a aplicaciones para el público en general. Proveerá señales para proporcionar información precisa de tiempo y posicionamiento en forma gratuita.

Cualquier usuario equipado con un receptor podrá acceder a este servicio, sin necesidad de ninguna autorización. La precisión de posición y la disponibilidad serán superiores a las de GPS y sus versiones futuras. El servicio abierto permitirá a los usuarios que posean receptores de uso corriente determinar su posición con un margen de error de unos pocos metros. Se estima que la mayoría de los receptores utilizarán señales conjuntas de Galileo y GPS, lo que ofrecerá a los usuarios una notable mejora en la prestación de servicios en áreas urbanas.

Las frecuencias serán E5A, E5B, L1.

**Servicio para aplicaciones críticas (Safety-of-Life - SoL)**

Se utilizará para la mayoría de las aplicaciones de transporte donde la vida humana se podría poner en peligro si la prestación de los servicios del sistema de radionavegación se viera degradada sin notificación en tiempo real.

Este servicio proporcionará la misma precisión en posicionamiento y en información precisa de tiempo que el servicio abierto. La diferencia principal es el alto nivel de integridad de cobertura mundial para las aplicaciones donde la seguridad es crítica, como por ejemplo la navegación aérea y las aplicaciones ferroviarias donde la precisión garantizada es esencial. Este servicio aumentará la seguridad, especialmente donde no hay servicios tradicionales de infraestructura terrestre. Su alcance mundial aumentará la eficiencia de las empresas que operan a escala mundial como aerolíneas y compañías marítimas transoceánicas.

El servicio estará asegurado y sus prestaciones se obtendrán mediante el uso de receptores certificados de doble frecuencia. En tales condiciones la futura Sociedad de Explotación GALILEO (GALILEO Operating Company – GOC) garantizará el servicio SoL.

Las frecuencias: serán E5A, E5B, L1.

**Servicio Comercial (Commercial Service – CS)**

Estará orientado a aplicaciones de mercado que requieren un nivel superior de prestaciones que las que ofrece el servicio abierto. Brindará servicios de valor añadido a cambio del pago de un canon.

El servicio comercial agrega dos señales a las señales de acceso abierto. Este par de señales está protegido mediante cifrado comercial el cual será gestionado por los prestadores de servicios y la futura GOC. El acceso será controlado a nivel de receptor con claves de protección de acceso. Ejemplos de servicios típicos de valor añadido incluyen difusión de datos, garantías de servicio, servicios de información precisa de tiempo provisión de modelos de ionosféricos y señales locales de corrección diferencial para determinar proporcionar gran precisión. Varios de estos servicios serán desarrollados por terceros —prestadores regionales— quienes comprarán a la sociedad explotadora del sistema GALILEO Operating Company el derecho de uso de las señales comerciales.

La frecuencia será E6.

**Servicio público regulado (Public Regulated Service – PRS)**

Servicio "robusto" y de acceso controlado para aplicaciones gubernamentales. El servicio PRS será utilizado por usuarios tales como la policía y la aduana.

Instituciones civiles controlarán el acceso al servicio PRS cifrado cuyo ingreso por región o grupo de usuarios cumplirá las políticas de seguridad aplicables en toda Europa. Deberá estar operativo en todo momento y en cualquier circunstancia, especialmente en períodos de crisis o cuando otros servicios puedan estar interferidos intencionadamente. El PRS es un servicio independiente, en forma tal que otros servicios pueden ser denegados sin que esto afecte a la disponibilidad del servicio PRS. Una característica que destaca a al servicio PRS es la robustez de su señal, lo cual lo protege contra los efectos de las interferencias intencionadas y de los intentos de emisión intencionada de una señal modificada.

Las frecuencias serán E6 y L1.

Servicio de búsqueda y salvamento (Search and Rescue Service – SAR)

Este servicio brindará importantes mejoras al sistema de Búsqueda y Salvamento (SAR) existente, como por ejemplo:

- Recepción casi en tiempo real de mensajes de socorro transmitidos desde cualquier punto de la Tierra (el tiempo medio de espera es actualmente de una hora)
- Localización precisa de alertas (pocos metros, en lugar de los 5 km actualmente especificados)
- Detección por múltiples satélites para evitar el bloqueo en condiciones de poca visibilidad de los satélites
- Mayor disponibilidad del segmento espacial (30 satélites en órbita terrestre media que se añaden a los cuatro satélites en órbita terrestre baja y los tres satélites geo estacionarios del actual sistema).

Por otra parte Galileo introducirá nuevas funciones, tales como enlace de retorno (del operador del SAR a la baliza emisora de socorro). De esta forma, facilitará las operaciones de rescate y ayudará a reducir el índice de falsas alarmas. Este servicio se está definiendo en cooperación con los responsables del sistema COSPAS-SARSAT y sus características y operaciones se regulan bajo el control de la Organización Marítima Internacional (OMI) y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

## **FINANCIACION.**

Se estimaba que el proyecto tendría un coste de entre 2.200 y 2.950 millones de euros durante el periodo 1999-2008, que podría variar según las aportaciones de otros gobiernos interesados en el sistema, siendo asumido en fases tempranas de su desarrollo por organismos gubernamentales europeos para después ser completado con 2/3 del total con capital privado. Las compañías involucradas más importantes son: EADS, las españolas Hispasat y AENA, la británica Inmarsat, la italiana Finmeccanica, las francesas Alcatel y Thales, Deutsche Telekom y German Aerospace Centre.

Sin embargo la puesta en funcionamiento del sistema se ha retrasado hasta 2010, por lo que el presupuesto total se estima en 3.400 millones de euros

En el año 2007 el ministro de Transporte de Alemania, Wolfgang Tiefensee espera la creación de 150.000 puestos de trabajo relacionados con el sistema en la UE

### **6.6.2.- SISTEMA CHINO BEIDOU**

Beidou es el nombre de 1 GNSS desarrollado por China para su propio sistema de navegación. Beidou es un proyecto desarrollado por la República Popular de China para obtener un sistema de navegación por satélite. "Beidou" es el nombre chino para la constelación de la Osa Mayor.

Según informaciones oficiales ofrecerá dos tipos de servicios: el primero será abierto y podrá dar una posición con un margen de 10 metros de distancia, 0,2 metros por segundo de velocidad y 0,000005 segundos de tiempo. El segundo servicio será autorizado solo para determinados clientes y ofrecerá servicios más precisos y con mayores medidas de seguridad.

A diferencia de los sistemas GPS, GLONASS, y GALILEO, que utilizan satélites en órbitas bajas y ofrecen servicio global, Beidou usa satélites en órbita geoestacionaria. Esto implica que el sistema no requiera una gran constelación de satélites, pero limita su cobertura sobre la tierra a los satélites que son visibles. China está también asociada con el proyecto Galileo, el cual no es todavía operacional.

Actualmente está en fase de proyecto.

### **6.7.- VULNERABILIDADES DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATELITES**

La vulnerabilidad más notable de los GNSS es la posibilidad de ser interferida la señal (la interferencia existe en todas las bandas de radio navegación). Existen varias fuentes de posible interferencia a los GNSS, tanto dentro de la banda como fuera de esta, particularmente por enlaces de microondas terrestres punto a punto permitidos por varios estados (1 559 – 1610 MHz). Estos enlaces se irán eliminando gradualmente entre los años 2005 y 2015.

Las señales de los sistemas GNSS son vulnerables debido a la potencia relativamente baja de la señal recibida, pues provienen de satélites y cada señal cubre una fracción significativamente grande de la superficie terrestre.

En aviación las normas y métodos recomendados (SARPS) de la OACI para los GNSS exigen un nivel de rendimiento específico en presencia de niveles de interferencia definidos por la máscara de interferencia del receptor. Estos niveles de interferencia son generalmente acordes al reglamento de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). La interferencia de niveles superiores a la máscara puede causar pérdida de servicio pero no se permite que tal interferencia resulte en información peligrosa o que induzca a error.

### **TIPOS DE INTERFERENCIA**

Las interferencias pueden ser voluntarias o involuntarias.

#### **INTERFERENCIA INVOLUNTARIA**

La probabilidad y consecuencias operacionales de esta interferencia varían con el medio. No se considera una amenaza importante siempre que los estados ejerzan el control y protección adecuados del espectro electromagnético tanto para las atribuciones de frecuencias existentes como nuevas. Además, la introducción de nuevas señales GNSS en nuevas frecuencias asegurará que la interferencia no intencional no provoque la pérdida completa del servicio (salida), aunque experimente cierto deterioro en su rendimiento.

Se ha determinado que la mayor parte de los casos de interferencia de GNSS notificados proviene de los sistemas de a bordo y la experiencia con la instalación del GNSS ha permitido identificar

varias fuentes de interferencia involuntaria.<sup>1</sup> Los dispositivos electrónicos portátiles también pueden causar interferencia al GNSS y a otros sistemas de navegación.

Las fuentes terrestres de interferencia incluyen actualmente las comunicaciones VHF móviles y fijas,<sup>2</sup> enlaces de radio punto a punto en la banda de frecuencias GNSS, armónicas de estaciones de televisión, ciertos sistemas de radar, sistemas de comunicaciones móviles por satélite y sistemas militares. Las ciudades grandes con fuentes considerables de interferencia de radiofrecuencias (RF), los sitios industriales, e tc., son más propensos a la interferencia involuntaria que las regiones remotas, donde esta interferencia es muy poco factible. La probabilidad de esa interferencia depende de la reglamentación estatal del espectro, de la administración de frecuencias y de su cumplimiento en cada estado o región.

### INTERFERENCIA INTENCIONAL

Debido a su poca potencia, las señales de los GNSS pueden bloquearse con transmisores de baja potencia. Aunque no se han registrado casos de bloqueo intencional dirigido a aeronaves civiles, por ejemplo, la posibilidad de obstrucción intencional de la señal debe considerarse y evaluarse como una amenaza. Si el impacto es mínimo, la amenaza potencial es baja pues no hay motivación para interferir. La magnitud del impacto potencial puede aumentar conforme el GNSS tenga más aplicaciones y se dependa más de este sistema.

La interferencia por simulación de señales (spoofing) es la corrupción intencional de señales de navegación para que la aeronave se desvíe y siga una trayectoria de vuelo falsa. La simulación de señales de GNSS por satélite es tecnológicamente mucho más compleja que la simulación de radioayudas a la navegación convencionales basadas en tierra. La simulación de radiodifusión de datos GBAS es tan difícil como la simulación de radioayudas de aterrizaje convencionales.

Aunque la interferencia por simulación de señales teóricamente puede inducir a una aeronave determinada a errores de navegación, es muy probable que se detecte con procedimientos normales.<sup>3</sup> Los sistemas de advertencia de proximidad del terreno (GPWS) y anticollisión de a bordo (ACAS) dan protección adicional contra colisiones con el terreno y con otras aeronaves. En vista de la dificultad de interferir por simulación con los GNSS, no se consideran necesarias medidas operacionales singulares para mitigarla.

### EFFECTOS IONOSFERICOS Y OTROS EFFECTOS ATMOSFERICOS

Las precipitaciones fuertes sólo atenúan las señales de satélite GNSS una pequeña fracción de dB y no afecta las operaciones.

Los efectos troposféricos se tratan mediante el diseño del sistema y no representan un aspecto de vulnerabilidad. Pero hay dos fenómenos ionosféricos que sí deben considerarse:

- **Cambios ionosféricos rápidos y grandes.** Cerca del ecuador geomagnético se observan frecuentemente cambios rápidos y grandes en la ionosfera, pero su efecto no es lo suficientemente grande como para afectar las operaciones en ruta ni las de aproximaciones que no son de precisión. Los cambios ionosféricos causan errores de telemetría que deben tenerse en cuenta en el diseño del sistema dado se pueden mitigar con el uso de sistemas de aumentación GNSS (SBAS, ABAS, GBAS), aunque pueden limitar los servicios GBAS y SBAS que se proporcionen en la región ecuatorial y utilicen una frecuencia GNSS única.
- **El centelleo ionosférico.** Este es insignificante en las latitudes medias pero en las regiones ecuatoriales, y en menor grado en las altas latitudes, este puede causar la pérdida temporal de las señales de uno o más satélites. La experiencia operacional en las regiones ecuatoriales

ha demostrado que la probabilidad de pérdida del servicio GNSS actual es poca debido al número relativamente grande de satélites a la vista. El centelleo puede interrumpir la recepción de las radiodifusiones de los satélites de órbita geoestacionaria (GEO) del SBAS, pero es poco probable que provoque la pérdida completa del servicio GNSS y puede mitigarse con el agregado de nuevas señales y satélites GNSS.

### **OTRAS VULNERABILIDADES**

También es necesario considerar las vulnerabilidades de los segmentos terrestre y espacial del GNSS. Existe el riesgo de número insuficiente de satélites en una constelación dada debido a la falta de recursos para mantenerla, fallos en los lanzamientos o de satélite. Un fallo del segmento de control de la constelación o un error humano puede llegar a causar la falla de múltiples satélites de una constelación.

Otro riesgo es la interrupción del servicio o su degradación durante una situación de estado de emergencia nacional. Los países que proveen señales para la navegación por satélite pueden negar su disponibilidad, es lo que se denomina disponibilidad selectiva. El propietario de un sistema de navegación por satélite tiene la capacidad de degradar o eliminar servicios basados en los satélites de la navegación sobre cualquier territorio que desee. Así, si la navegación por satélite se convierte en un servicio esencial, los países sin sus propios sistemas de navegación por satélite se convertirán en clientes de los estados que provean estos servicios.

En el caso del tráfico aéreo si la denegación de señal es regional, se bloquearían todas las señales civiles de GNSS y el espacio aéreo afectado estaría cerrado al tránsito aéreo civil.

Los países proveedores de servicios GNSS pueden modificar o denegar estos ante situaciones de emergencia. En la imagen el presidente estadounidense George W. Bush reunido con el Consejo de Seguridad Nacional tras los atentados del 11 de septiembre de 2001.

Otra situación menos probable sería la degradación o denegación de las señales de los satélites principales o de los satélites de aumento en toda el área de cobertura.

En la evaluación de los riesgos operacionales relacionados con las vulnerabilidades del GNSS hay que considerar dos aspectos principales:

- La probabilidad de interrupción del GNSS.
- El efecto de la interrupción.

Al considerar estos aspectos en función del espacio aéreo, los proveedores de servicios de navegación aérea pueden determinar si se necesita mitigarlos y, de ser así, a qué nivel. Se requiere mitigación para las interrupciones que tengan efectos importantes y probabilidades de ocurrir de moderadas a altas.

Las nuevas señales y constelaciones principales de satélites reducirán considerablemente la vulnerabilidad del GNSS. La utilización de señales más fuertes y las frecuencias diversas planeadas para el GPS, el GLONASS y Galileo eliminarán efectivamente el riesgo de interferencia involuntaria, pues es muy poco probable que una fuente de tal interferencia afecte simultáneamente a más de una frecuencia.

Más satélites (incluso constelaciones múltiples) eliminarán el riesgo de interrupciones completas del GNSS debidas al centelleo y la multiplicidad de frecuencias mitigará el efecto de los cambios ionosféricos. Los futuros satélites geoestacionarios mitigarán el efecto de la ionosfera en el SBAS usando satélites cuyas líneas visuales estén separadas cuando menos a 45°.

Las señales más robustas y las nuevas frecuencias del GNSS hacen más difícil interferir intencionalmente con todos los servicios GNSS. Más constelaciones principales de satélites reducen el riesgo de falla del sistema, de errores operacionales o de interrupciones de servicio. También pueden seguir proporcionando servicio mundial en el caso poco probable de que el proveedor de un elemento de GNSS modifique o de niegue el servicio debido a situaciones de regímenes de excepción de un estado.

La administración y una fuerte financiación del sistema son esenciales para la operación continua de los servicios GNSS y para mitigar las vulnerabilidades del sistema mencionadas, excepto la posible interrupción global del servicio debida a una emergencia nacional. Un medio efectivo de mitigar la vulnerabilidad de interrupción global es que los proveedores de servicios adopten una política de denegación regional en caso de emergencia nacional.

## CAPITULO 7.- SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

GPS es la abreviatura de NAVSTAR GPS. Este es el acrónimo en inglés de **NAV**igation **S**ystem with **T**ime And **R**anging **G**lobal **P**ositioning **S**ystem, (que en español significa Sistema de Posicionamiento Global con Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia).

GPS es la solución para una de las incógnitas más antiguas que se ha planteado el hombre: e l preguntarse “¿En qué lugar de la tierra me encuentro?

Uno puede pensar que esta es una pregunta sencilla de responder. Nos podemos ubicar fácilmente observando los objetos que nos rodean, lo cual nos da una cierta posición en relación a los mismos. Pero ¿qué sucede cuando no hay objetos a nuestro alrededor? ¿Y qué ocurre si nos encontramos en medio del desierto o del océano? Durante muchos siglos, este problema fue resuelto empleando al sol y las estrellas para navegar. Asimismo, en tierra, los topógrafos y los exploradores utilizaban puntos conocidos hacia los cuales hacían referencia para sus mediciones o para encontrar su camino.

Estos métodos cumplían su cometido dentro de ciertos límites, pues el Sol y las estrellas no pueden ser observados cuando el cielo está nublado. Además, aún efectuando las mediciones lo más precisas posibles, la posición no podía ser determinada en forma muy exacta.

Después de la Segunda Guerra Mundial, se hizo necesario que el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica encontrara una solución al problema de determinar una posición absoluta y exacta. Durante los siguientes 25 años, se llevaron a cabo muy diversos proyectos y experimentos con este fin, entre los que se cuentan los sistemas Transit, Timation, Loran, Decca, etc. Todos ellos permitían determinar posiciones pero continuaban siendo muy limitados en precisión y funcionalidad.

A principio de los años 70 se propuso un nuevo proyecto (el GPS). Este concepto prometió a satisfacer todos los requerimientos del gobierno de los Estados Unidos, principalmente el poder determinar (en cualquier momento y bajo cualquier condición atmosférica), una posición precisa en cualquier punto de la superficie terrestre.

El GPS es un sistema basado en Satélites artificiales, dispuestos en una constelación de 24 de ellos, para brindar al usuario una posición precisa. En este punto es importante definir el término “precisión”.

Para un excursionista o un soldado que se encuentre en el desierto, la precisión significa más o menos 15m. Para un barco en aguas costeras, la precisión significa 5m. Para un topógrafo, 1cm o menos. El GPS se puede emplear para obtener todos estos rangos de precisión, la diferencia radica en el tipo de receptor a emplear y en la técnica aplicada.

El GPS fue diseñado originalmente para emplearse con fines militares, en cualquier momento y sobre cualquier punto de la superficie terrestre. Poco tiempo después de presentarse las propuestas originales de este sistema, resultaba claro que el GPS también podía ser utilizado en aplicaciones civiles y no únicamente para obtener el posicionamiento personal (como era previsto para los fines militares). Las dos primeras aplicaciones principales de tipo civil fueron aquellas para navegación y topografía. Hoy en día, el rango de aplicaciones va desde la navegación de automóviles o la administración de una flotilla de camiones, hasta la automatización de maquinaria de construcción

### **7.1.- ANTECEDENTES HISTORICOS**

Un producto directo de la “raza del espacio” de los años 60, el GPS es realmente el resultado de la combinación de dos programas independientes que fueron comenzados en los principios de los años 60: el programa de TIMATION de la marina de guerra de los EE.UU. y el Proyecto de 621B de la fuerza aérea de los EE.UU. Otro sistema similar en concepto básico al GPS actual en los EE.UU. era el Programa del TRÁNSIT de la marina de guerra, que también fue desarrollado en los años 60. El Departamento de Defensa de los EE.UU. (DoD) inicialmente diseñó el GPS para el uso de los militares solamente, proporcionando por mar, aire, y a tropas de tierra de los Estados Unidos y Miembros de la OTAN con un sistema de posición unificado, de alta precisión, para cualquier estación, mundial, en tiempo real.

La primera declaración de los EE.UU. con respecto al uso civil del GPS vino en 1983 que seguían tragando del coreano. El vuelo 007 de las líneas aéreas después de ella se perdió sobre el territorio que pertenecía a la Unión Soviética. Como resultado de esto el incidente, en 1984, presidente Reagan anunció que el sistema de navegación mundial sería hecho disponible para el uso civil internacional una vez que el sistema llegó a ser operacional. En 1987, el DoD pidió formalmente al Departamento de Transporte (DoT) para establecer y para proporcionar una oficina para responder a los usuarios civiles de lo necesario y para trabajar de cerca con el DoD para asegurar la puesta en práctica apropiada del GPS para el uso civil. Dos años más tarde, el guardacostas de los EE.UU. hicieron de la agencia plomo para este proyecto. El 8 diciembre de 1993, el DoD y el punto capacidad operacional inicial formalmente declarada (IOC), significando que el NAVSTAR GPS era capaz de mantenimiento del servicio de colocación estándar (SPS). El 27 de abril de 1995, el comando del espacio de la fuerza aérea de los E.E.U.U. El GPS formalmente declarado cumplió los requisitos para la capacidad operacional completa (FOC), significando que la constelación de 24 satélites operacionales había terminado con éxito la prueba para la capacidad militar.

Asignado por mandato por Congreso, la aplicación militar utilizará el sistema GPS libremente y para uso civil para posiciones absolutas en tiempo real y posición de las naves, aviones, y vehículos de tierra, así como el punto diferenciado de alta precisión que posiciona y transfiere el tiempo.

### 7.1.1.- SISTEMA DE SATELITE TRANSIT.

Primer sistema de navegación basado en satélites entró en servicio en 1965. Al principio de los 60 los departamentos de defensa, transporte y la agencia espacial norteamericana (DoD, DoT y NASA respectivamente) tomaron interés en desarrollar un sistema para determinar la posición basado en satélites. El sistema debía cumplir los requisitos de globalidad, abarcando toda la superficie del globo; continuidad, funcionamiento continuo sin afectarle las condiciones atmosféricas; altamente dinámicas, para posibilitar su uso en aviación y precisión. Esto llevó a producir diferentes experimentos como el *Timation* y el sistema 621B en desiertos simulando diferentes comportamientos.

El sistema Transit estaba constituido por una constelación de 6 satélites en órbita polar baja, a una altura de 1074 Km. Tal configuración conseguía una cobertura mundial pero no constante. La posibilidad de posicionarse era intermitente, pudiéndose acceder a los satélites cada 1.5 h. El cálculo de la posición requería estar siguiendo al satélite durante 15 minutos constantemente.

Transit trabajaba con dos señales en dos frecuencias, para evitar los errores debidos a la perturbación ionosférica. El cálculo de la posición se basaba en la medida continua de la desviación de la frecuencia *Doppler* de la señal recibida y su posterior comparación con tablas y gráficos. El error de Transit estaba en torno a los 250 m. Su gran aplicación fue la navegación de submarinos y de barcos.



**Satélite TRANSIT 1-A**

### 7.1.2.- SISTEMA DE SATELITE DOPPLER.

El principio de operación de los sistemas de satélite Doppler consiste que al pasar el satélite sobre la estación de observación transmite, en forma continua y con mucha precisión, una frecuencia de radio controlada. Cuando el transmisor se aproxima a un receptor, la señal recibida tiene una mayor frecuencia que la transmitida. Al alejarse el satélite de la estación, la frecuencia disminuye respecto a la frecuencia emitida. Este fenómeno pueden reconocerlo quienes hayan escuchado el cambio en el tono del silbato de un tren que se acerca y luego se aleja. La magnitud del cambio de frecuencia, también conocido como *efecto doppler* que es una función de la distancia al satélite se mide en un

receptor. Si se conoce la frecuencia de la transmisión, la órbita del satélite y el tiempo preciso de la observación puede calcularse la posición de la estación receptora en función del *efecto doppler*.

El conocimiento de la órbita del satélite es un principio básico para el cálculo de la ubicación de las receptoras. Esta información sobre la órbita puede conseguirse de las llamadas *efemérides radiadas* o de las efemérides precisas. Las efemérides radiadas consisten en una predicción sobre cuál será la órbita del satélite en un tiempo dado.

### 7.1.3.- SISTEMA NAVSTAR GPS.

Transit tenía muchos problemas. La entonces URSS tenía un sistema igual que el Transit de nombre *TSICADA*. Había que dar un gran salto. La guerra fría fomentaba invertir unos cuantos billones de dólares en un revolucionario sistema de navegación, que dejara a la URSS definitivamente atrás.

Se concibió un sistema formado por 24 satélites en órbita media, que diera cobertura global y continua. Rockwell (California) se llevó uno de los contratos más importantes de su época, con la elaboración a su cargo de 28 satélites. El primer satélite se lanzó en 1978, y se planificó tener la constelación completa 8 años después. Unido a varios retrasos, el desastre del lanzamiento del Challenger paró el proyecto durante 3 años. Por fin, en diciembre de 1983 se declaró la fase inicial del GPS. El objetivo del sistema GPS era ofrecer a las fuerzas de los EE.UU., la posibilidad de posicionarse (disponer de la posición geográfica) de forma autónoma o individual, de vehículos o de armamento, con un coste relativamente bajo, con disponibilidad global y sin restricciones temporales. La iniciativa, financiación y explotación corrieron a cargo del departamento de la Defensa de los EE.UU. (DoD), el GPS se concibió como un sistema militar estratégico. En 1984 un vuelo civil de Korean Airlines fue derribado por la Unión Soviética al invadir por error su espacio aéreo. Ello llevó a la administración de Reagan a ofrecer uso global y sin restricciones temporales, de esta forma se conseguía un retorno a la economía de los EE.UU. inimaginables unos años atrás. Además suponía un gran liderazgo tecnológico originando un vertiginoso mercado de aplicaciones. Desde 1984, con muy pocos satélites en órbita, aparecieron tímidamente fabricantes de receptores GPS destinados al mundo civil (Texas Instruments y Trimble Navigation).

### 7.1.4.- EL GPS HOY EN DÍA.

Hoy en día el GPS supone un éxito para la administración y economía americana no interesando a nadie que se reduzca la inversión en el sistema, sino todo lo contrario. La política de administración de los EE.UU. es mantener un coste cero para el usuario del sistema GPS, potenciar sus aplicaciones civiles a la vez que se mantiene el carácter militar. Las aplicaciones disponibles se orientan principalmente a sistemas de navegación y aplicaciones cartográficas: topografía, cartografía, geodesia. Sistemas de información geográfica (SIG), mercado de recreo (deportes de montaña, náutica, expediciones de todo tipo, etc.) patrones de tiempo y sistemas de sincronización, aplicaciones diferenciales que requieran mayor precisión además de las aplicaciones militares y espaciales.

En cuanto al reparto del mercado los más importantes son la navegación marítima, la aérea y la terrestre.

Con una flota de 46 millones de embarcaciones en todo el mundo, de los 98 % son de recreo, la navegación marítima supone un mercado nada despreciable. Recreo, pesqueros, mercantes, petroleros, dragados y plataformas petrolíferas son perfecto candidato al uso del GPS. El volumen de venta de GPS está en torno de los 300 millones de dólares anuales.

En cuanto a la navegación aérea con unos 300,000 aviones en todo el mundo. El equipamiento del GPS para navegación intercontinental o entre aeropuertos tiene una penetración anual del 5 % (aproximadamente unas 15,000 unidades). Sin embargo en aproximación el GPS no tiene la suficiente integridad y precisión aunque la FAA está financiando el proyecto WAAS (Wide Area Augmentation System) que refuerza el sistema GPS y será útil para aproximaciones de clase I (en EE.UU.).

Pero el auténtico mercado del GPS en el mundo es la navegación terrestre. Con 435 millones de turistas y 135 millones de camiones es el más amplio mercado potencial de las aplicaciones comerciales del GPS. De hecho el crecimiento del equipamiento de GPS mundial es en torno a los 2,000 millones de dólares anuales, lo que lleva a una penetración del 4% en el año 2001. Entre las aplicaciones con más desarrollo contamos con el sistema de navegación independiente, sistemas de seguimiento automático, control de flotas, administración de servicios, etc. Solo en los EE.UU. existen 25,000 autobuses equipados con GPS y en Japón hay un millón de vehículos privados que cuentan con sistema GPS en su equipamiento.

## **7.2. DESCRIPCION DEL SISTEMA DE NAVEGACION MUNDIAL.**

El GPS es un sistema basado en los satélites global pasivo, para cualquier estación, de 24 horas de navegación (GNSS) gestionado y mantenido por el Departamento de Defensa de los EE.UU. (DoD). Consiste en una constelación nominal de 24 satélites en a gran altitud órbitas. Su misión primaria es proporcionar la posición, la navegación pasivas, en tiempo real, tridimensionales y datos de la velocidad para la tierra, el aire, y las fuerzas estratégicas y tácticas navales que funcionan en cualquier parte en el mundo. La segunda misión y el más predominante es el uso de una amplia gama de la transferencia civil de la posición y del tiempo. Al receptor terrestre del GPS de los parásitos atmosféricos o de la vaguación es simplemente un dispositivo de la medida de la gama: se miden las distancias entre la antena de receptor y cuatro a diez satélites en la visión, y la posición es resuelta por medio de intersecciones ajustadas de los vectores de la gama--equivalente a una solución del trilateración en examinar terrestre.

Estas distancias son determinadas en el receptor del GPS exacto midiendo el tiempo que toma cifrado señalar para viajar de los satélites a la antena del receptor. Los componentes críticos en el sistema son relojes atómicos exactos sincronizados en los satélites. Además, muchos receptores del GPS pueden también medir la diferencia de fase de la señal basada en los satélites portadoras de 19 y 24 cm, teniendo en cuenta secundario-centímetro distanciarse la resolución de la gama al satélite. Este proceso de la medida de la resolución de la fase es similar al usado en el equipo que examina de la distancia de la tierra (EDM) electrónica convencional de la medida.

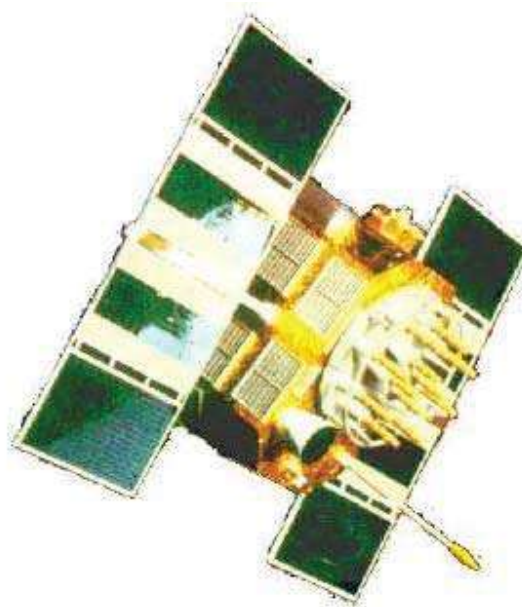
### **7.2.1.- EL SEGMENTO ESPACIAL.**

El segmento del espacio del sistema está formado por los satélites GPS que mandan señales de radio desde el espacio. Nominalmente la constelación operacional del GPS consiste en 24 satélites que orbitan alrededor de la tierra en 12 horas. Hay a menudo más de 24 satélites operacionales pues los nuevos se lanzan para sustituir satélites más viejos que tienen una vida media aproximada de siete años y medio. La repetición basada en los satélites de las órbitas casi la misma pista de tierra (que la tierra da vuelta debajo de ellos) una vez cada día. La altitud de la órbita es tal que los satélites repiten la misma pista y configuración sobre cualquier punto aproximadamente cada 24 horas (4 minutos anterior cada día). Hay seis planos orbitales (con SVS nominal cuatro en cada uno),

espaciados igualmente (60 grados de separado), e inclinados en cerca de 55 grados con respecto al plano ecuatorial. Esta constelación provee del usuario entre SVS cinco y ocho visible de cualquier punto en la tierra.

Cada satélite GPS lleva a bordo varios relojes atómicos muy precisos. Estos relojes operan en una frecuencia fundamental de 10.23 MHz, la cual se emplea para generar las señales transmitidas por el satélite.

Los satélites transmiten constantemente en dos ondas portadoras. Estas ondas portadoras se encuentran en la banda L (utilizada para transmisiones de radio) y viajan a la Tierra a la velocidad de la luz.



Dichas ondas portadoras se derivan de la frecuencia fundamental, generada por un reloj atómico muy preciso.

1 La portadora L1 es transmitida a 1575.42 MHz ( $10.23 \times 154$ )

2 La portadora L2 es transmitida a 1227.60 MHz ( $10.23 \times 120$ )

La portadora L1 es modulada por dos códigos. El código C/A o Código de adquisición Gruesa modula a 1.023 MHz ( $10.23/10$ ) y el código P o código de precisión modula a 10.23 MHz.

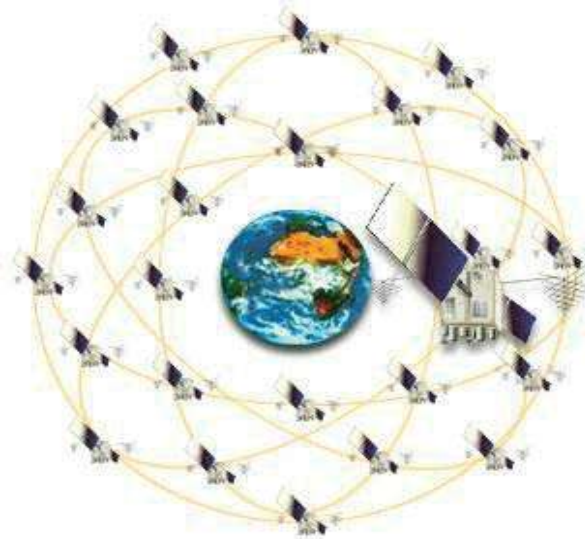
L2 es modulada por un código solamente. El código P en L2 modula a 10.23 MHz.

Los receptores GPS utilizan los diferentes códigos para distinguir los satélites. Los códigos también pueden ser empleados como base para realizar las mediciones de pseudo distancia y a partir de ahí, calcular una posición.

### **CONSTELACION GPS.**

La constelación del GPS consiste en 24 satélites en 6 planos orbitales de los cuales 4 satélites se encuentran en cada plano a 20,180 Km. de altura y a 60 grados de inclinación. Hasta la actualidad ha habido tres generaciones de satélites, los de Block I (actualmente inoperativos), Block II (9 satélites entre 1989 y 1990 y 19 adicionales hasta 1997) y Block IIR (un satélite en 1998). En enero

de 1999 orbitan 27 satélites GPS en total. Como ya se mencionó anteriormente los satélites están situados a 20,180 Km. De altura desplazándose a una velocidad de 14,500 Km/h. Las orbitas son casi circulares y se repite el mismo recorrido sobre la superficie terrestre (mientras la tierra rota a su vez sobre si misma) de esta forma en prácticamente un día (24 horas menos 4 minutos) un satélite vuelve a pasar sobre el mismo punto de la tierra. Los satélites quedan situados sobre 6 planos orbitales (con un mínimo de 4 satélites cada uno), espaciados equidistantes a 60 grados e inclinados a unos 15 grados respecto al plano ecuatorial. Esta disposición permite que desde cualquier punto de la superficie terrestre sean visibles entre 5 y 8 satélites.



### 7.2.2.- EL SEGMENTO DE CONTROL.

El segmento de control consiste de una estación de control maestro, 5 estaciones de observación y 4 antenas de tierra distribuidas entre 5 puntos muy cercanos al ecuador terrestre. La estación maestra de control (MC S) está situada en Falcón AFB en Colorado Springs. Las estaciones de control miden las señales procedentes de los satélites y son incorporadas en modelos orbitales para cada satélite. Los modelos calculan datos de ajuste de órbita (efemérides) y correcciones de los relojes de cada satélite. La estación maestra envía las efemérides y correcciones de reloj a cada satélite. Cada satélite envía posteriormente subconjuntos de estas informaciones a los receptores GPS mediante señales de radio.

El segmento de control rastrea los satélites GPS, actualiza su posición orbital y calibra y sincroniza sus relojes.

Otra función importante consiste en determinar la órbita de cada satélite y predecir su trayectoria para las siguientes 24 horas. Esta información es cargada a cada satélite y posteriormente transmitida desde allí. Esto permite al receptor GPS conocer la ubicación de cada satélite.

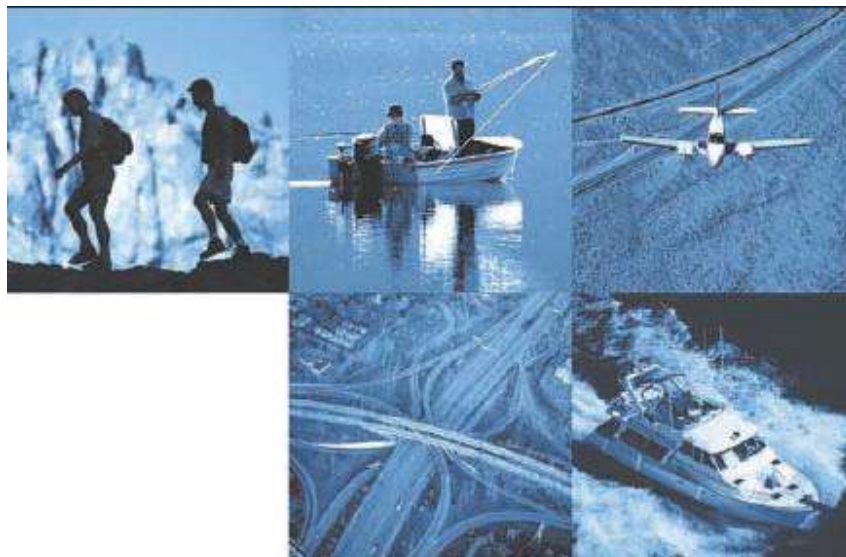
Las señales de los satélites son leídas desde las estaciones: Ascensión, Diego García y Kwajaleín. Estas mediciones son entonces enviadas a la estación de control maestro en Colorado Springs, donde son procesadas para determinar cualquier error en cada satélite. La información es enviada

posteriormente a las cuatro estaciones de observación equipadas con antenas de tierra y de allí cargadas a los satélites.



### 7.2.3.- EL SEGMENTO DEL USUARIO.

El segmento de Usuarios comprende a cualquier que reciba las señales GPS con un receptor, determinando su posición y/o la hora. Algunas aplicaciones típicas dentro del segmento de Usuarios son: la navegación en tierra para excursionistas, ubicación de vehículos, topografía, navegación marítima y aérea, control de maquinaria, etc.



El segmento del usuario del GPS lo forman los receptores del GPS y la comunidad de usuario. Los receptores del GPS convierten señales de SV en la posición, la velocidad, y estimaciones del tiempo. Cuatro satélites se requieren para computar las cuatro dimensiones de X, de Y, de Z (posición) y del tiempo. Los receptores del GPS se utilizan para la navegación, posicionamiento, las estimaciones temporales, y para otras investigaciones.

La navegación en 3 dimensiones es la función principal del GPS. Se construyen receptores GPS para aeroplanos, embarcaciones, vehículos terrestres y equipos portátiles de pequeño tamaño.

El posicionamiento preciso es posible usando receptores del GPS en posiciones de referencia que proporcionan datos de corrección y posicionamiento relativos a los receptores alejados. El examen, el control geodésico, y los estudios de la placa tectónicas son ejemplos.

Las aplicaciones del tiempo y estabilización de frecuencia se basan en la posición de los relojes que incorporan los satélites y que son monitorizados continuamente por las estaciones de control. Los satélites actuales incorporan cuatro relojes atómicos, 2 de rubidio y otros 2 de Cesium que ofrecen una estabilidad de frecuencia equivalente a un error de un segundo en 30,000 años. Hay que tener en cuenta que un error de 30 ns provoca un error de 30 cm. Los observatorios astronómicos, sistemas de telecomunicaciones, sincronización de centrales eléctricas y laboratorios de certificación pueden obtener señales de tiempo y frecuencia de alta precisión mediante receptores especiales de GPS. Las señales de GPS han sido utilizadas para medir parámetros atmosféricos.

### **7.3.- SERVICIOS DE POSICIONAMIENTO DISPONIBLES DEL GPS.**

El plan Federal de Radionavegación especifica dos tipos de servicios de posicionamiento para sistema GPS los cuales se describen a continuación:

#### **7.3.1.- SERVICIOS DE POSICIONAMIENTO STANDARD (SPS).**

Los usuarios civiles por todo el mundo utilizan el SPS sin carga o restricciones. La mayoría de los receptores son capaces de recibir y de usar la señal del SPS. La exactitud del SPS es degradada intencionalmente por el Departamento de Defensa de EE. UU. por el uso de la disponibilidad selectiva.

La precisión estimada del SPS es la siguiente:

- exactitud horizontal de 100 metros
- exactitud de la vertical de 156 metros
- 340 nanosegundos de exactitud del tiempo

Estas figuras de la exactitud del GPS son del plan federal de 1999 Radionavegación. Las figuras son exactitudes del 95%, y expresan el valor de dos desviaciones de estándar del error radial de la posición real de la antena a un conjunto de estimaciones de la posición hechas bajo el ángulo de elevación basado en los satélites especificado (cinco grados) y condiciones de PDOP (menor de seis).

Para los cuadros horizontales de la exactitud el 95% es el equivalente de 2drms (dos-distancia raíz-significar-ajustada), o dos veces la desviación de estándar radial del error. Para los errores de la vertical y del tiempo el 95% es el valor de desviaciones dos-estándares del error vertical o del error del tiempo.

Los fabricantes del receptor pueden utilizar otras medidas de la exactitud. el error del Raíz -significar-cuadrado (RMS) es el valor de una desviación de estándar (el 68%) del error en una, dos o tres dimensiones. El probable circular del error (CEP) es el valor del radio de un círculo, centrado en la posición real que contiene el 50% de las estimaciones de la posición. El probable esférico del error (SEPT) es el equivalente esférico del CEP, de que es el radio de una esfera, centrado en la posición real, que contiene el 50% de las tres estimaciones de la posición de la dimensión. En comparación con 2drms, los drms, o las figuras del RMS, el CEP y SEPT no son afectados por los errores grandes de la equivocación que les hacen una medida excesivamente optimista de la exactitud

Algunas hojas de la especificación del receptor enumeran exactitud horizontal en el RMS o el CEP y sin la disponibilidad selectiva, haciendo esos receptores aparece más exacto que éstos especificados por vendedores más responsables usando medidas más conservadoras del error.

### **7.3.2.- SERVICIO DE POSICIONAMIENTO PRECISO (PPS).**

Únicamente algunos usuarios autorizados con el equipo criptográfico, llaves y los receptores especialmente equipados utilizan el sistema de posicionamiento preciso. Este sistema está reservado para los ejércitos de los EE.UU. y sus aliados, ciertas agencias estatales del gobierno estadounidense, y algunos usuarios civiles seleccionados y aprobados específicamente por el gobierno de los EE.UU., pueden utilizar el PPS.

La exactitud estimada del PPS es la siguiente:

- exactitud horizontal de 22 metros
- exactitud de la vertical de 27.7 metros
- exactitud del tiempo de 200 nanosegundos (UTC).

### **LOS DATOS DEL GPS.**

El mensaje de la navegación del GPS consiste en unas tramas temporizadas de datos que marcan el tiempo de transmisión de cada subparte del mensaje en el momento cuando son transmitidos por el SV. Una trama de datos ocupa 1500 bits divididos en cinco subpartes de 300 bit. Un marco de los datos o tramas se transmite cada treinta segundos (50 bits/s). Tres subpartes de 6 segundos contienen datos orbitales y temporales. Las correcciones del reloj de SV se envían en la primera subparte y en la segunda y tercera se transmite datos de información orbital (e efemérides). Las subparte cuatro y cinco se utilizan para transmitir diversas páginas de los datos del sistema. Un sistema entero de veinticinco bastidores (125 subparte) hace para arriba el mensaje completo de la navegación que se envía sobre un período minucioso 12.5.

Los marcos de los datos (1500 pedacitos) se envían cada treinta segundos. Cada marco consiste en cinco subpartes. Las subpartes del bit de datos (300 pedacitos transmitidos sobre seis segundos) contienen los pedacitos de paridad que permiten la comprobación de los datos y la corrección de error limitada. Los parámetros de los datos del reloj describen el reloj de SV y su relación al tiempo del GPS. Los parámetros de los datos del calendario astronómico describen las órbitas de SV para las secciones cortas de las órbitas basadas en los satélites. Normalmente, un receptor recopila

nuevos datos del calendario astronómico cada hora, pero puede utilizar los viejos datos por hasta cuatro horas sin mucho error. Los parámetros del calendario astronómico se utilizan con un algoritmo que compute la posición de SV para en cualquier momento dentro el período de la órbita descrita por el sistema de parámetro del calendario astronómico.

Los almanaques son parámetros orbitales aproximados de los datos para todo el SVS. Los almanaques del diez-parámetros describen las órbitas de SV demasiado extendidas y los períodos de la hora (útil por meses en algunos casos) y un sistema para todo el SVS es enviado por cada SV durante 12.5 minutos (por lo menos). El tiempo de la adquisición de la señal en start-up del receptor se puede ayudar perceptiblemente por la disponibilidad de almanaques actuales. Los datos orbitales aproximados se utilizan para preestablecer el receptor con la frecuencia aproximada de Doppler de la posición y del portador (el cambio de la frecuencia causada por el índice del cambio en gama al SV móvil) de cada SV en la constelación.

Cada módem completo de SV incluye un modelo ionosférico que se utilizará en el receptor aproxime la fase retrase a través del ionosfera en cualquier localización y hora.

Cada SV envía la cantidad a la cual el tiempo del GPS se compensa a partir de tiempo coordinado universal. Esta corrección se puede utilizar por el receptor para fijar el UTC a dentro de 100 ns. Se envían otros parámetros y banderas del sistema que caracterizan los detalles del sistema.

## **POSICION Y HORA DEL GPS.**

El receptor produce la secuencia del código de C/A para un SV específico con una cierta forma de un generador de código de C/A. Los receptores modernos almacenan generalmente un sistema completo del código de C/A en memoria, pero un hardware, registro de cambio, puesta en práctica puede también ser utilizado.

El generador de código de C/A produce una diversa secuencia de 1023 ondas para cada ajuste del pulso de la fase. En una puesta en práctica del registro de cambio las virutas del código son cambiadas de puesto en tiempo matando el reloj que controla los registros de cambio. En un esquema de las operaciones de búsqueda de la memoria las virutas requeridas del código se recuperan de memoria.

El generador de código de C/A repite la misma secuencia del PRN-código 1023-chip cada milisegundo. Los códigos de PRN se definen para 32 números de identificación basados en los satélites. El receptor resbala una reproducción del código en tiempo hasta que hay correlación con el código de SV. Si el receptor aplica un diverso código de PRN a una señal de SV no hay correlación. Cuando el receptor utiliza el mismo código que los SV y los códigos comienzan a alinearse, se detecta una cierta energía de la señal. Mientras que los códigos de SV y del receptor se alinean totalmente, la señal de portador del separar-espectro es de-separar y se detecta la energía completa de la señal. Un receptor del GPS utiliza la energía detectada de la señal en la señal correlacionada de alinear el código de C/A en el receptor con el código en la señal de SV. Una última versión del código se compara generalmente con una versión temprana para asegurar que el pico de la correlación esté seguido. Una fase trabó el lazo que puede trabarse o a un positivo o la mitad del ciclo negativa (un lazo bifásico de la cerradura) se utiliza para desmodular el mensaje de la navegación de 50 hertzios de la señal de portador del GPS. El mismo lazo se puede utilizar para medir y seguir la frecuencia portadora (cambio de Doppler) y guardando la pista de los cambios al

oscilador numéricamente controlado, la fase de la frecuencia portadora puede ser seguida y ser medida. La posición del comienzo del código del receptor PRN a la hora de la correlación completa es la época de la llegada (TOA) del SV PRN en el receptor. Este TOA es una medida de la gama al SV compensado por la cantidad a la cual el reloj del receptor se compensa a partir de tiempo del GPS. Este TOA se llama la pseudorange.

### **NAVEGACION POR SEUDORANGOS.**

La posición del receptor es donde las pseudoranges de un sistema de SVS se intersecan. Intersección de las superficies de la gama y la posición se determina de medidas múltiples de la pseudorange en una sola época de la medida. Las medidas de pseudoranges se utilizan junto con las estimaciones de la posición de SV basadas en los elementos orbitales exactos (los datos del calendario astronómico) enviados por cada SV. Estos datos orbitales permiten que el receptor compute las posiciones de SV en tres dimensiones en instante que enviaron sus señales respectivas. Cuatro satélites (navegación normal) se pueden utilizar para determinar tres dimensiones y la posición. Las dimensiones de la posición son computadas por el receptor en Tierra, el sistema Tierra-Fijo, de coordenadas de X Y Z (ECEF XYZ).

Se utiliza el tiempo para corregir la compensación en el reloj de receptor, permitiendo el uso de un reloj de receptor barato. La posición de SV en XYZ se computa a partir de cuatro pseudoranges de SV y de la corrección del reloj y de los datos del calendario astronómico.

La posición del receptor se computa de las posiciones de SV, de las pseudoranges medidas (corregidas para el reloj de SV compensa, el retraso ionosférico, y los efectos relativistas), y de una estimación de la posición del receptor (generalmente la posición computada pasada del receptor). Ejemplo: De la Solución de la Navegación del Pseudorange

El calendario astronómico usado en ejemplo de la solución de la navegación del Pseudorange. Tres satélites se podían utilizar para determinar tres dimensiones de la posición con un reloj de receptor perfecto. Esto es en la práctica raramente posible y el SVS tres se utiliza para computar un arreglo de dos dimensiones, horizontal (en latitud y longitud) dado una altura asumida. Esto es a menudo posible en el mar o en el avión equipado con altímetro. Cinco o más satélites pueden proporcionar la posición, el tiempo y la redundancia. Más SVS puede proporcionar certeza adicional del arreglo de la posición y puede permitir la detección de las señales que estén fuera de tolerancia bajo ciertas circunstancias.

### **FRECUENCIA Y CODIGOS DE DIFUSION DEL GPS.**

Cada satélite del NAVSTAR transmite señales de alta frecuencia en dos frecuencias de la banda L, señaladas como L1 y L2. La frecuencia portadora L1 es de 1575.42 megahertzios (megahertzio) y tiene una longitud de onda de aproximadamente 19 centímetros (cm.). La frecuencia portadora L2 es de 1227.60 megahertzios y tiene una longitud de onda de aproximadamente 24cm. La señal L1 se modula con 1.023 megahertzios a través del código de adquisición Gruesa (C/A) y 10.23 megahertzio del código de la precisión (código P). La señal L2 se modula solamente con el código P de 10.23 megahertzios. Ambos códigos pueden ser utilizados para determinar la gama entre el usuario y un satélite. El código P se cifra normalmente y está disponible solamente para los usuarios autorizados. Cuando está cifrado, se llama el Y-código. Cada satélite lleva relojes atómicos muy precisos para generar la información de la sincronización necesaria para la posición exacta. Una navegación de 50 hertzios el mensaje también se transmite en el código P (Y) y código C/A. Este mensaje contiene el

reloj basado en los satélites, datos geográficos, datos basados en los satélites del calendario astronómico, información orbital, datos ionosféricos de la corrección de la propagación de la señal, la salud y el estado de los satélites, los datos basados en los satélites del almanaque para la constelación entera, y el otro de información general.

### **RUIDO PSEUDOALEATORIO.**

El código C/A modulado se refiere como ruido pseudoaleatorio (PRN). Este ruido pseudoaleatorio es realmente un código de pedacito 1023 con un índice de reloj de 1.023 megaciclos que repite cada 1 milisegundo. Los 10.23 megaciclos código P (Y) PRN tienen una secuencia cifrada de 267 días. Esta secuencia de tiempo de marcas muy precisas permiten que los receptores de tierra comparen y computen la época de la transmisión entre la estación basada en los satélites y de tierra. A partir de este tiempo de transmisión, la gama al satélite puede ser derivado. Ésta es la base detrás de medidas de la gama del GPS. Cada satélite tiene un diverso PRN. El código C/A de los intervalos del pulso son aproximadamente cada 293 m en gama y el código P más exacto cada 29 m.

### **PSEUDORANGOS.**

Un pseudorango es el retraso de tiempo que existe entre el reloj basado en los satélites y el receptor al registrarlo, según lo determinado de pulsos de código C/A o del código P. Esta diferencia de tiempo compara a la medida de la gama pero se llama un “pseudorango” puesto que a la hora de la medida, el reloj de receptor no se sincroniza con el reloj basado en los satélites. En la mayoría de los casos, una posición en tiempo real tridimensional absoluta de la navegación se puede obtener cerca de la observación por lo menos de cuatro pseudorangos simultáneos. El servicio de colocación estándar (SPS) utiliza menos pseudorangos exactos de L1 con código C/A para la navegación en tiempo real del GPS. La señal L2 no se utiliza en el SPS de colocación. El servicio de colocación exacto (PPS) es el uso en tiempo real militar fundamental de la navegación del GPS. Los pseudorangos se obtienen usar el código P más alto del pulso (es decir una exactitud más alta) en ambas frecuencias (L1 y L2). Los códigos P se cifran para prevenir uso civil o extranjero desautorizado. Para descifrar este código se requiere una llave especial.

### **MEDIDA DE LA FASE DEL PORTADOR.**

Medidas de seguimiento de la frecuencia portadora son las diferencias de fase entre el Doppler cambiado el satélite de posición y las frecuencias del receptor. Las medidas de la fase son resueltas sobre longitudes de onda relativamente cortas del portador L1 y L2 (19 cm y 24 cm respectivamente). Esto da un plazo de fase resolución en el nivel del milímetro. Las diferencias de fase son continuamente cambiadas debido a que el satélite cambia constante de geometría en la tierra. Sin embargo, tales efectos se resuelven en el receptor y el post-proceso subsecuente de los datos cuando las medidas de la fase del portador se observan y se comparan entre dos estaciones (es decir pariente o el modo diferenciado), la exactitud del vector de la línea de fondo entre las estaciones de bajo del nivel del centímetro es alcanzable en tres dimensiones. Varias tecnologías del receptor y técnicas de proceso dan un plazo de fase del portador medidas que se utilizarán en la posición en tiempo real al centímetro.

**MENSAJES DE DIFUSION DEL GPS Y DATOS DEL CALENDARIO ASTRONOMICO.**

Cada satélite del NAVSTAR GPS difunde periódicamente datos referentes a las correcciones del reloj, sistema, y estado basado en los satélites, y lo más críticamente posible, su posición o datos de los calendarios astronómicos. Existen dos tipos básicos de datos del calendario astronómico los cuales son: la difusión y la precisa.

**CALENDARIOS ASTRONÓMICOS DE LA DIFUSIÓN.**

Los calendarios astronómicos de la difusión son realmente posiciones basadas en los satélites previstas dentro del mensaje de la navegación que se transmite de los satélites en tiempo real. Los calendarios astronómicos pueden ser adquiridos en tiempo real por un receptor capaz de adquirir el código C/A o el código P. La difusión se computan los calendarios astronómicos usando los últimos datos de seguimiento de los satélites. Se siguen los satélites continuamente por las estaciones de monitoreo para obtener datos más recientes que se utilizarán para las predicciones de la órbita. Estos datos son analizados por la estación de control principal y los nuevos parámetros para las órbitas basadas en los satélites y estos retransmiten de nuevo a los satélites. Esta carga por teletratamiento se realiza diariamente con los nuevos elementos orbitales previstos transmitidos cada hora por el mensaje de la navegación. El mensaje de la navegación de la difusión consiste en 25 marcos de datos, cada marco de datos que consiste en 1.500 pedacitos. Cada marco se divide en 5 sub-partes. En los 50 hertzios la tarifa de transmisión, tarda seis segundos para recibir una subparte, o 12.5 minutos para recibir los 25 marcos de datos. La información siguiente es difusión del satélite al receptor del GPS del usuario:

- Tiempo-de-transmisión basada en los satélites
- Posición basada en los satélites
- Salud basada en los satélites
- Corrección basada en los satélites del reloj
- Efectos del retardo de propagación
- Transferencia del tiempo a UTC (USNO)
- Estado de la constelación

**CALENDARIOS ASTRONÓMICOS EXACTOS.**

Los calendarios astronómicos exactos se basan en los datos de seguimiento orbitales reales que son post procesados para obtener las posiciones basadas en los satélites más exactas. Estos calendarios astronómicos están disponibles en todo momento y son más exactos que los calendarios astronómicos de la difusión porque se basan en orbitario real siguiendo datos y datos no previstos. El marco de referencia usado es el servicio internacional de la rotación de la tierra: Marco de referencia terrestre (ITRF). El servicio internacional del GPS de la NASA (IGS) es la agencia que coordina las órbitas precisas y su seguimiento y después disemina esta información entre los centros de datos globales para uso público. Además, un archivo sumario informativo se proporciona para documentar el cómputo y transportar la información relevante sobre los satélites observados, tales como maniobras o mantenimiento. NOAA. El Servicio Geodésico Nacional (NGS) de los EE.UU. se ha señalado como la agencia federal responsable de proporcionar calendarios astronómicos orbitales exactos al público en general. Puesto que las órbitas exactas son una combinación de varios movimientos en órbita alrededor de los centros de producción alrededor del globo, éste se retrasa en su disponibilidad hasta que todos los centros tengan divulgado el mensaje. También no

se hace disponible hasta que se haya terminado una semana completa del GPS. Las órbitas son generalmente están siete u ocho días disponibles después de la fecha de la observación. El NGS proporciona posiciones de órbita basadas en los satélites con un formato llamado SP3 cada 15 minutos en el marco de referencia actual de ITRF. Para la mayoría de la encuesta sobre USACE, el trazado, y los usos de la navegación, los calendarios astronómicos de la difusión son los adecuados para obtener las precisiones necesarias. Para los usos de alta precisión de la encuesta sobre el control de USACE (especialmente control vertical y la densificación) los calendarios astronómicos exactos finales deben ser utilizados.

#### **7.4.- METODOS DE POSICIONAMIENTO DEL GPS**

Existen diferentes métodos para obtener una posición empleando el GPS. El método a utilizar depende de la precisión requerida por el usuario y el tipo de receptor disponible. En un sentido amplio de la palabra, estas técnicas pueden ser clasificadas básicamente en tres clases:

Navegación Autónoma de Posición Absoluta. Empleando sólo un receptor simple. Utilizado por excursionistas, barcos en alta mar y las fuerzas armadas. La precisión de la posición es mejor que 100m para usuarios civiles y alrededor de 20m para usuarios militares.

Posicionamiento Diferencial de Fase. Ofrece una precisión de 0.5 – 20mm. Utilizado para diversos trabajos de topografía, control de maquinaria, etc.

Posicionamiento Diferencial Corregido. Más comúnmente conocido como DGPS, el cual proporciona precisiones del orden de 0.5 – 5 m. Utilizado para navegación costera, adquisición de datos para SIG (Sistema de Información Geográfica GIS), agricultura automatizada, etc.

##### **7.4.1. NAVEGACIÓN AUTONOMA Y DE POSICION ABSOLUTA.**

Esta es la técnica más sencilla empleada por los receptores GPS para proporcionar instantáneamente al usuario, la posición y altura y/o tiempo. La precisión obtenida es mejor que 100m (por lo general entre 30 y 40) para usuarios civiles y 5 – 15m para usuarios militares. Los receptores utilizados para este tipo de aplicación, son por lo general unidades pequeñas, portátiles y de bajo costo.

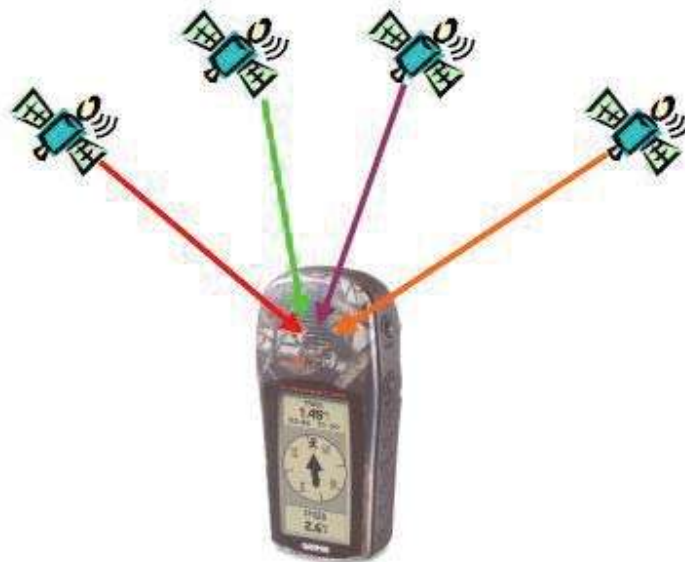
Todas las posiciones GPS están basadas en la medición de la distancia desde los satélites hasta el receptor GPS en tierra. Esta distancia hacia cada satélite puede ser determinada por el receptor GPS. La idea básica es la de una intersección inversa, la cual es utilizada por los trabajos en su trabajo diario. Si se conoce la distancia hacia tres puntos en relación a una posición, entonces se puede determinar la posición relativa a esos tres puntos. A partir de la distancia hacia un satélite, sabemos que la posición del receptor debe estar en algún punto sobre la superficie de una esfera imaginaria cuyo origen es el satélite mismo. La posición del receptor se podrá determinar al intersectar tres esferas imaginarias.

El problema con el GPS es que sólo se pueden determinar las pseudo distancias y el tiempo al momento que llegan las señales al receptor.

De este modo existen cuatro incógnitas a determinar: posición (X, Y, Z) y el tiempo que tarda en viajar la señal. Observando a cuatro satélites se generan cuatro ecuaciones que se cancelan. Esto está garantizado gracias a las configuraciones de las constelaciones NAVSTAR y GLONASS, según las cuales siempre tendremos en cualquier lugar del planeta al menos cuatro satélites sobre el horizonte.

El posicionamiento absoluto tiene la ventaja de que con un sólo instrumento de observación podemos obtener nuestra posición, pero posee una serie de inconvenientes que repercuten seriamente en la precisión del posicionamiento, y por ello no hace del método una aplicación apropiada en trabajos de precisión. Entre los inconvenientes más relevantes destacan:

- \* Influencia importante de los errores producidos por la atmósfera.
- \* En el caso de recibir señales de la constelación NAVSTAR, el efecto de la disponibilidad selectiva (S/A) hace que nuestro posicionamiento no sea el correcto.
- \* Imposibilidad de eliminar errores por compensación, como son el efecto multitrayectoria, osciladores, excentricidad de la antena, retardo atmosférico, etc.



Esto, hace sea una forma expedita de posicionamiento, resultando útil para usuarios de barcos, aviones, vehículos, deporte, ocio y todas aquellas aplicaciones donde la tolerancia de error al determinar una posición esté por encima de los cien metros, que viene a ser la precisión que ofrece generalmente el método, en función del tipo de receptor, estado de la constelación y condiciones de observación. Las soluciones se suelen obtener en tiempo real, bien con solución instantánea de navegación o por resolución de un sistema mínimos cuadrados en el que la redundancia del sistema está en función del tiempo de observación.

#### **7.4.1.1. CALCULO DE LA DISTANCIA AL SATELITE.**

Para calcular la distancia a cada satélite, se utiliza una de las leyes del movimiento.

$$\text{Distancia} = \text{Velocidad} \times \text{Tiempo}$$

Por ejemplo, es posible calcular la distancia que en un tren ha viajado si se conoce la velocidad de desplazamiento y el tiempo que ha venido desplazándose a esa velocidad. El GPS requiere que el receptor calcule la distancia del receptor al satélite.

La velocidad es la misma de las señales de radio. Las señales de radio viajan a la velocidad de la luz, a 290 000 km por segundo (186 000 millas por segundo).

El tiempo es aquel que le toma a una señal de radio en viajar desde el satélite al receptor GPS. Esto es un poco difícil de calcular, ya que se necesita conocer el momento en que la señal de radio salió del satélite y el momento en que llegó al receptor.

#### **CALCULO DE TIEMPO.**

La señal del satélite es modulada por dos códigos, el código C/A y el código P. El código C/A está basado en el tiempo marcado por un reloj atómico de alta precisión. El receptor cuenta también con un reloj que se utiliza para generar un código C/A coincidente con el del satélite.

De esta forma, el receptor GPS puede “hacer coincidir” o correlacionar el código que recibe del satélite con el generado por el receptor.

El código C/A es un código digital que es “seudo aleatorio”, o que aparenta ser aleatorio. En realidad no lo es, si no que se repite mil veces por segundo. De esta forma es como se calcula el tiempo que tarda en viajar la señal de radio desde el satélite hasta el receptor GPS.

#### **POSICION ABSOLUTA DEL PUNTO.**

La posición absoluta implica el uso solamente de un solo receptor pasivo en la localización del usuario de recolectar datos de los satélites múltiples para determinar la posición georeferenciada del usuario. La determinación de una posición de un punto respecto a la tierra utiliza realmente una técnica común a examinar que es la trilateración terrestre, es decir resección electrónica de la medida de la distancia. El receptor del GPS del usuario, simplemente mide la distancia (es decir gamas) entre la tierra y los satélites del NAVSTAR GPS. La posición del usuario es determinada por la intersección resecada de las gamas observadas a los satélites. Por lo menos 3 las gamas basadas en los satélites se requieren para computar una posición tridimensional. En práctica real, por lo menos 4 observaciones basadas en los satélites se requieren para resolver variaciones que miden el tiempo. El adicionar más gamas basadas en los satélites proporcionará redundancia (y más exactitud) en la solución de la posición. El valor coordinado tridimensional resultante está concerniente a sistema de referencia geocéntrico. El receptor del GPS se puede funcionar en un modo estático o dinámico. Las exactitudes obtenidas por la posición absoluta del GPS son dependientes en la calidad del receptor del GPS del usuario, localización, y longitud del tiempo de la observación, del DOP, y de muchos otros factores. Para alcanzar precisiones menores de un metro se pueden obtener con medidas de largo plazo con equipo GPS de posición absoluta y que contenga otras características especiales y usando las técnicas del post proceso con el software adecuado. Se espera que en un futuro haya mejoras basadas en los satélites con una tecnología mas moderna del GPS, y también un código realzado y se espera que las técnicas de proceso del portador, y otros refinamientos mejoren perceptiblemente la precisión de las medidas absolutas tales que las exactitudes de la navegación del metro-nivel pueden estar disponibles en tiempo real.

#### **7.4.1.2- FUENTES DE ERROR.**

Hasta este momento, hemos asumido que la posición obtenida del GPS es muy Precisa y libre de errores, pero existen diferentes fuentes de error que degradan la posición GPS desde algunos metros en teoría, hasta algunas decenas de metros. Estas fuentes de error son:

- Retrasos ionosféricos y atmosféricos.

- Errores de reloj del satélite y del receptor.
- Efecto multitrayectoria.
- Dilución de la precisión.
- Disponibilidad Selectiva (S/A)
- Antisofing (A-S)

### RETRASOS IONOSFERICOS Y ATMOSFERICOS.

Al pasar la señal del satélite a través de la ionosfera, su velocidad puede disminuir, este efecto es similar a la refracción producida al atravesar la luz un bloque en vidrio. Estos retrasos atmosféricos pueden introducir un error en el cálculo de la distancia, ya que la velocidad de la señal se ve afectada. (La luz sólo tiene una velocidad constante en el vacío).

La ionosfera no introduce un retraso constante en la señal. Existen diversos factores que influyen en el retraso producido por la ionosfera.



#### a) Elevación del satélite.

Las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación bajo se verán más afectadas que las señales de satélites que se encuentran en un ángulo de elevación mayor. Esto es debido a la mayor distancia que la señal tiene que viajar a través de la atmósfera.

#### b) La densidad de la ionosfera está afectada por el Sol.

Durante la noche, la influencia ionosférica es mínima. Durante el día, el efecto de la ionosfera se incrementa y disminuye la velocidad de la señal. La densidad de la ionosfera varía con los ciclos solares (actividad de las manchas solares).

La actividad de las manchas solares llega a su máximo cada 11 años. Al momento de escribir este texto, el siguiente pico máximo ocurrirá cerca del año 2000.

Además de esto, las llamaradas solares pueden ocurrir de manera aleatoria, lo cual también tiene un efecto sobre la ionosfera.

Los errores debidos a la ionosfera pueden ser mitigados empleando uno de dos métodos:

- 1 El primer método supone la toma de un promedio del efecto de la reducción de la velocidad de la luz causada por la ionosfera. Este factor de corrección puede ser entonces aplicado a una serie de cálculos. Sin embargo, esto depende de un promedio y obviamente esta condición promedio no ocurre todo el tiempo. Por lo tanto, este método no es la solución óptima para la mitigación del error ionosférico.
- 2 El segundo método supone el empleo de los receptores de “doble frecuencia”. Tales receptores miden la frecuencia L1 y L2 de la señal GPS. Es sabido que cuando una señal de radio viaja a través de la ionosfera, ésta reduce su velocidad en una relación inversamente proporcional a su frecuencia. Por lo tanto, si se comparan los tiempos de arribo de las dos señales, se puede estimar el retraso con precisión. Nótese que esto es posible únicamente con receptores GPS de doble frecuencia. La mayoría de receptores fabricados para la navegación son de una frecuencia.

*c) El vapor de agua también afecta la señal GPS.*

El vapor de agua contenido en la atmósfera también puede afectar las señales GPS. Este efecto, el cual puede resultar en una degradación de la posición, puede ser reducido utilizando modelos atmosféricos.

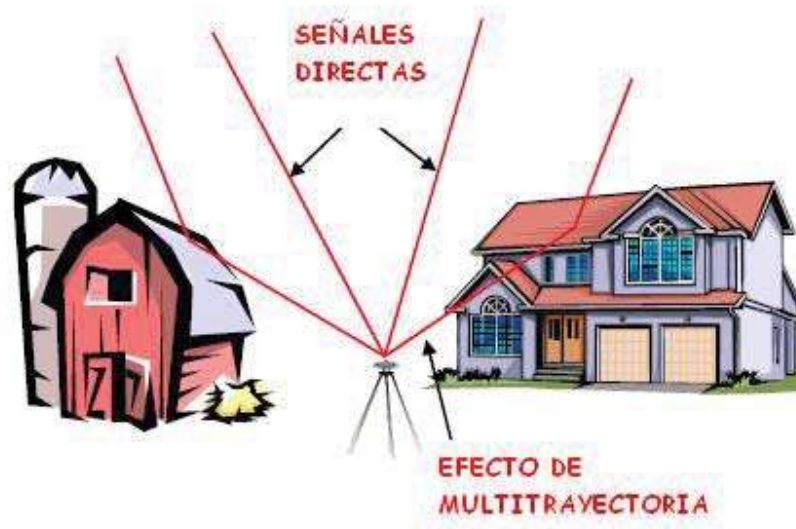
### **ERRORES EN LOS RELOJES DE LOS SATELITES Y DEL RECEPTOR.**

Aunque los relojes en los satélites son muy precisos (cerca de 3 nano segundos), algunas veces presentan una pequeña variación en la velocidad de marcha y producen pequeños errores, afectando la exactitud de la posición. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos, observa permanente los relojes de los satélites mediante el segmento de Control y puede corregir cualquier deriva que pueda encontrar.

### **ERRORES DE MULTITRAYECTORIA.**

El error de multitrayectoria se presenta cuando el receptor está ubicado cerca de una gran superficie reflectora, tal como un lago o un edificio.

La señal del satélite no viaja directamente a la antena, sino que llega primero al objeto y luego es reflejada a la antena, provocando una medición falsa.



Este tipo de errores pueden ser reducidos utilizando antenas GPS especiales que incorporan un plano de tierra (un disco circular metálico de aproximadamente 50 cm de diámetro), el cual evita que las señales con poca elevación lleguen a la antena.

Para obtener la más alta exactitud, la solución preferida es la antena de bobina anular (choke ring antena). Una antena de bobina anular tiene 4 o 5 anillos concéntricos alrededor de la antena que atrapan cualquier señal indirecta.

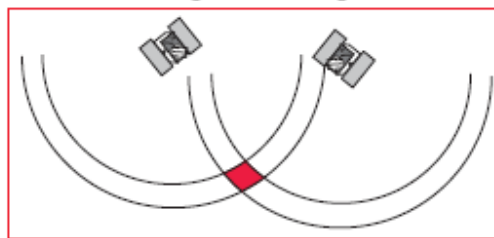
El efecto multitrayectoria afecta únicamente a las mediciones topográficas de alta precisión. Los receptores de navegación manuales no utilizan estas técnicas.

### **DILUCIÓN DE LA PRECISION.**

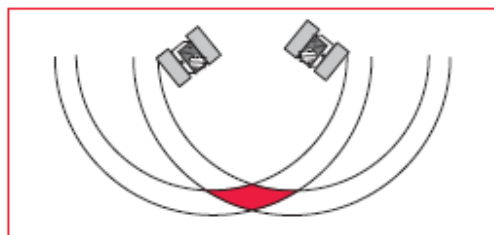
La Dilución de la Precisión (DOP) es una medida de la fortaleza de la geometría de los satélites y está relacionada con la distancia entre estos y su posición en el cielo. El DOP puede incrementar el efecto del error en la medición de distancia a los satélites.

La distancia hacia los satélites se ve afectada por los errores en la distancia previamente descritos. Cuando los satélites están bien distribuidos, la posición se puede determinar dentro del área sombreada del diagrama y el margen de error posible es mínimo.

Cuando los satélites están muy cerca unos de otros, el área sombreada aumenta su tamaño, incrementando también la incertidumbre en la posición.



**Satélites con buena distribución - poca incertidumbre en su posición**



**Satélites con mala distribución - alta incertidumbre en su posición**

Dependiendo en la dimensión, se pueden calcular diferentes tipos de Dilución de la Precisión.

VDOP.- Dilución Vertical de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección Vertical.

HDOP.- Dilución Horizontal de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección horizontal.

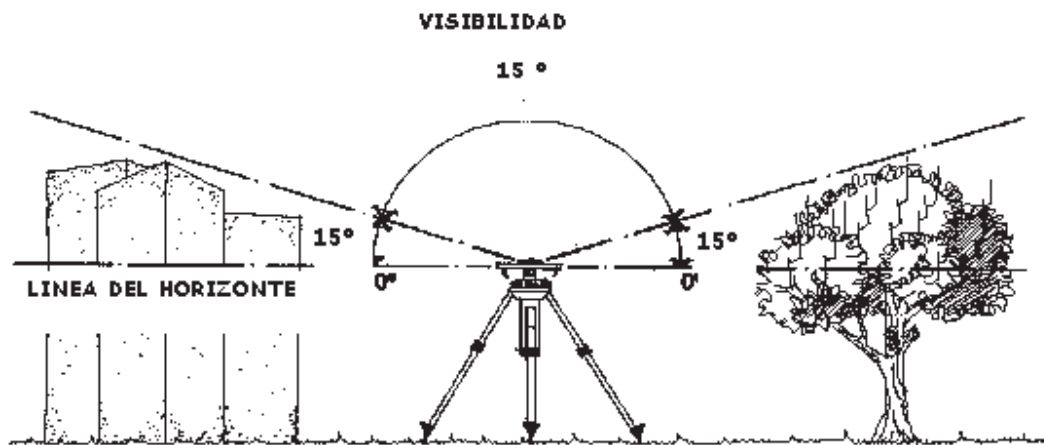
PDOP.- Dilución de la precisión en Posición. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D.

GDOP.- Dilución de la precisión geométrica. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D y en tiempo.

El valor DOP más útil a conocer 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 al componente del tiempo.

La mejor manera de minimizar el efecto del GDOP es observar tantos satélites como sean posibles. Cabe mencionar 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 de  $15^\circ$  sobre el horizonte. Las posiciones más precisas serán calculadas por lo general cuando el GDOP tiene un valor bajo usualmente menor que 8.

**DISPONIBILIDAD SELECTIVA (S/A).**

La disponibilidad selectiva es un proceso aplicado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos a la señal GPS. Lo anterior tiene como finalidad denegar, tanto a usuarios civiles como a las potencias hostiles, el acceso a toda la precisión que brinda el GPS, sometiendo a los relojes del satélite a un proceso conocido como “dithering” (dispersión), el cual altera el tiempo ligeramente. Además, las efemérides (o la trayectoria que el satélite seguirá), son transmitidas ligeramente alteradas respecto a las verdaderas.

El resultado final es una degradación en la precisión de la posición.

Vale la pena hacer notar que el S/A afecta a los usuarios civiles que utilizan un solo receptor GPS para obtener una posición autónoma. Los usuarios de sistemas diferenciales no se ven afectados de manera significativa por este efecto. Actualmente está planeado desactivar el efecto S/A a más tardar en el año 2006.

**ANTI-SPOOFING (A-S).**

El efecto Anti-Spoofing o Anti-engañeo es similar al efecto S/A, ya que ha sido concebido con la idea de no permitir que los usuarios civiles y las fuerzas hostiles tengan acceso al código P de la señal GPS, obligándolos a emplear el código C/A, al cual se aplica el efecto S/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.



#### 7.4.2- POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL (DGPS).

Muchos de los errores que afectan la medición de distancia a los satélites, pueden ser completamente eliminados o reducidos significativamente utilizando técnicas de medición diferenciales.

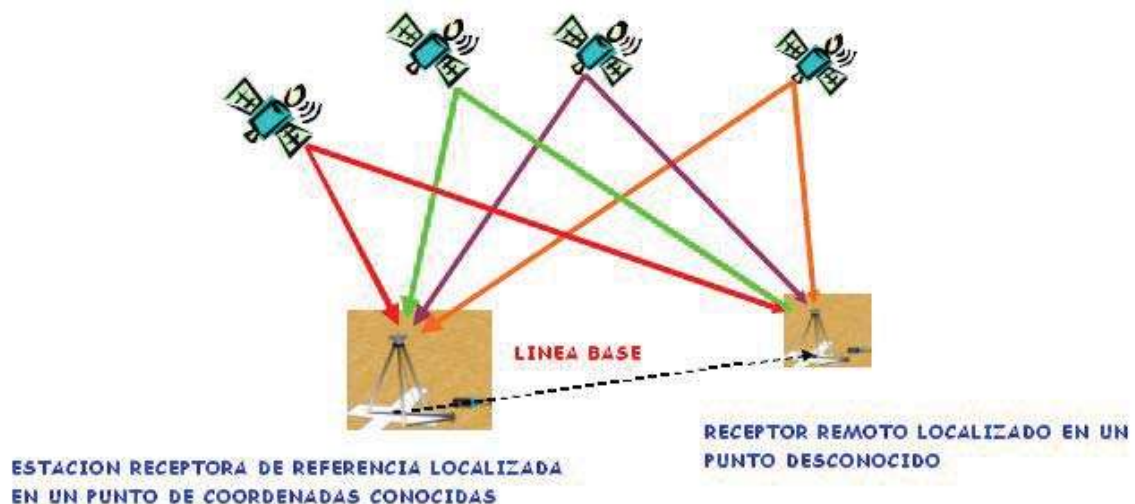
La técnica DGPS permite a los usuarios civiles incrementar la precisión de la posición de 100m a 2-3m o menos, haciéndolo más útil para muchas aplicaciones civiles. Es el que se realiza cuando las precisiones requeridas son mayores. Será mejor o peor en función del instrumental utilizado y la técnica de posicionamiento diferencial a la que se recurra. El fundamento del posicionamiento diferencial es la corrección de los errores de desajuste de los relojes de los satélites en una posición mediante los errores medidos en una posición conocida, para ello, un receptor de referencia o estación base calcula las correcciones para cada satélite.

Debido a que los pseud rangos deben ser corregidos antes del cálculo de la posición, las implementaciones de DGPS requieren que el receptor de referencia incluya un software que le permita seguir todos los satélites visibles y calcular las correcciones de los pseud rangos de cada uno de ellos. Estas correcciones son transmitidas a los receptores remotos quienes deben ser capaces de aplicarlas individualmente a cada satélite que se esté utilizando para el cálculo de la posición. Aplicar una simple corrección sobre la posición desde el receptor base al receptor remoto en un rango de distancias utilizable tiene limitaciones ya que ambos receptores deben utilizar el mismo conjunto de satélites para el cálculo de la posición y además deben tener el mismo GDOP (imposible para posiciones distintas) para ser afectados de forma idéntica por los errores de desajuste de reloj.

El posicionamiento diferencial consiste en hallar la posición absoluta de un punto (móvil, objetivo, etc.) mediante las observaciones realizadas desde ese punto a unos determinados satélites, sumadas a las realizadas en ese mismo instante desde otro punto (referencia) a esos mismos satélites. Por lo tanto, aquí aparece el concepto de *línea base*, que es la línea recta que une el punto de referencia y el punto objetivo.

Esta línea base, no es medida de forma directa, ya que nuestras observaciones son sobre los satélites y no entre los puntos. Por lo tanto, la obtención de la línea base se produce de forma indirecta. Es por esto que las incógnitas no son los incrementos de coordenadas entre los dos puntos, sino que son los diferenciales ( $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ) que hay que añadir a las coordenadas aproximadas absolutas ( $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ) de cada punto. Si conocemos de partida las coordenadas del punto de referencia, las

incógnitas se reducen a las del punto objetivo, que una vez halladas, unidas a las del punto de referencia, nos darán las componentes y valores de la línea base que los une.



Para resolver estos sistemas, se recurre a los algoritmos de simples, dobles y triples diferencias, con los que se consigue eliminar gran parte de los errores que afectan a la observación y garantizan una posición relativa excelente entre dos puntos unidos por una línea base. Por lo tanto, con este método podemos tener posiciones relativas muy buenas, pero las posiciones absolutas en el sistema de referencia son igual de precisas que si hubiéramos usado un posicionamiento absoluto. Para solucionar esto, se introducen como puntos de referencia aquellos de los que se tiene conocimiento de su posición absoluta con precisión sobre el sistema de referencia en el que estamos trabajando. A continuación se describe el proceso de cálculo de las posiciones a través de los elementos importantes que son el receptor de referencia y el receptor móvil:

### **EL RECEPTOR DE REFERENCIA.**

La antena del receptor de referencia es montada en un punto medido previamente con coordenadas conocidas. Al receptor que se coloca en este punto se le conoce como Receptor de Referencia o Estación Base.

Se enciende el receptor y comienza rastrear satélites. Puede calcular una posición autónoma utilizando las técnicas descritas en la anteriormente.

Debido a que el receptor se encuentra en un punto conocido, el receptor de la referencia puede estimar en forma muy precisa la distancia a cada uno de los satélites.

De esta forma, este receptor puede calcular muy fácilmente cual es la diferencia entre la posición calculada y la posición medida. Estas diferencias son conocidas como correcciones.

### **EL RECEPTOR MOVIL.**

El receptor móvil está al otro lado de estas correcciones y cuenta con un radio enlace de datos conectado para recibir las correcciones transmitidas por el receptor de referencia.

El receptor móvil también calcula las distancias hacia los satélites y luego aplica las correcciones de distancia recibidas de la referencia. Esto le permite calcular una posición mucho más precisa de lo que sería posible si se utilizaran las distancias no corregidas.

Utilizando esta técnica, todas las fuentes de error descritas anteriormente son minimizadas, de aquí que se obtiene una posición más precisa.

### **CONSIDERACIONES ADICIONALES.**

Hay que tener en consideración el radio enlace. Existen muchos tipos de radio enlaces que pueden transmitir en diferentes rangos de frecuencias y distancias. El desempeño del radio enlace dependerá de varios factores, incluyendo:

- 1 La frecuencia del radio
- 2 La potencia del radio.
- 3 El tipo y calidad de la antena de radio
- 4 La posición de la antena.

Se han establecido redes de receptores GPS y poderosos transmisores de radios, para transmitir en una frecuencia de seguridad marítima solamente. Estos son conocidos como radio faros. Los usuarios de este servicio (mayormente barcos navegando cerca de la costa), sólo necesitan adquirir un receptor móvil que pueda recibir la señal de Radio Faro. Tales sistemas han sido instalados a lo largo de las costas de muchos países. Otros dispositivos, tales como teléfonos celulares, pueden ser utilizados para la transmisión de datos. Además de los sistemas de Radio Faros también existen otros sistemas que proveen cobertura sobre extensas áreas y que son operados por compañías comerciales privadas. Existen también propuestas para sistemas de propiedad del gobierno de EE.UU., tales como el sistema basado en satélites de la Autoridad Federal de Aviación (FAA) de los Estados Unidos, se trata del WAAS (Wide Area Augmentation System), el Sistema de la Agencia Espacial Europea (ESA) y el sistema propuesto por el gobierno japonés.

Existe un formato estándar para la transmisión de datos GPS. Se denomina el formato RTCM (por sus siglas en inglés Radio Technical Comisión Maritime Services), una organización sin fines de lucro auspiciada por la industria. Este formato se usa en forma común alrededor del todo el mundo.

### **CORRECCION DIFERENCIAL POR CODIGO.**

Las correcciones diferenciales deben ser utilizadas en tiempo real, con técnicas de post procesamiento. Las correcciones en tiempo real pueden ser transmitidas por radio-enlaces. La Guardia costera de los EE.UU mantiene una red estaciones diferenciales y transmite correcciones DGPS mediante radiobalizas proporcionando cobertura gran parte de la costa estadounidense. Las correcciones DGPS se suelen transmitir usando el formato estándar RTCM (Radio Technical Commission Marine).

Las correcciones pueden ser grabadas para realizar un post procesamiento. Muchos organismos públicos y privados graban estas correcciones para distribuir las por medios electrónicos. Existen servicios privados de corrección DGPS que utilizan subportadoras de banda FM comercial, enlaces vía satélite o emisoras privadas para aplicaciones a tiempo real.

Para eliminar la dispersión selectiva (y otros errores de sincronismo), las correcciones diferenciales deben ser calculadas en la estación de referencia y aplicadas en el receptor remoto con un intervalo menor que el tiempo de variación de SA. Los tiempos medios de actualización de las correcciones suele ser inferior a los 20 segundos. El sistema DGPS elimina los errores comunes a la estación de referencia y los receptores remotos, no aplicándose a los errores de multitrayectoria o

ruido del receptor. Los errores tienden a ser comunes cuando los receptores están próximos (menos de 100 km).

#### **7.4.3.- GPS DIFERENCIAL DE FASE PORTADORAS.**

El GPS Diferencial de Fase es utilizado principalmente en la Topografía y trabajos relacionados para alcanzar precisiones en posición del orden de 5 – 50mm. La técnica utilizada difiere de todas las descritas anteriormente e involucra un intenso análisis estadístico. Como técnica diferencial significa que un mínimo de 2 receptores GPS deben ser utilizados en forma simultánea. Esta es una de las similitudes con el método de Corrección Diferencial de Código descrita anteriormente. El receptor de referencia está siempre ubicado en un punto fijo o de coordenadas conocidas. El otro (o los otros) receptores están libres para moverse alrededor. Estos son conocidos como receptores móviles. Se calcula entonces las líneas base entre la referencia y los móviles. La técnica básica es igual a las descritas previamente, es decir la medición de las distancias a 4 satélites y la determinación de la posición a partir de esas distancias. La diferencia radica en la forma en la que se calculan esas distancias.

#### **FASE PORTADORA, CODIGOS C/A, Y CODIGO P.**

En este punto es importante definir los diversos componentes de la señal GPS.

##### **FASE PORTADORA**

Es la onda sinusoidal de la señal L1 o L2 creada por el satélite. La portadora L1 es generada a 1575.42 MHz y la portadora L2 a 10.23 MHz.

##### **CODIGO C/A.**

Es el código de Adquisición Gruesa. Modula la portadora L1 a 1.023 MHz. Este código es una secuencia de 1023 modulaciones de doble fase binarias pseudoaleatorias a razón de 1.023 MHz, teniendo así un periodo de repetición de código de un milisegundo. Este código fue seleccionado para proporcionar buenas propiedades de rastreo.

##### **CODIGO P.**

El código protegido o preciso que modula a las portadoras L1 y L2. Este código se hará disponible por medio del DoD, solo para usuarios especializados. El código P es una secuencia muy larga de modulaciones bifásicas binarias pseudoaleatorias en el portador GPS a un rango de 10.23 MHz, lo cual no se repite por alrededor de 38 semanas. Cada satélite usa un segmento de una semana de este código, el cual es único para cada satélite GPS y es reconfigurado cada semana.

Las ondas portadoras están diseñadas para llevar los códigos binarios C/A y P en un proceso conocido como modulación. Modulación significa que los códigos están superpuestos sobre la onda portadora. Los códigos son códigos binarios, esto significa que sólo pueden tener 2 valores -1 y +1. Cada vez que el valor cambia, hay un cambio en la fase de la portadora.

#### **SEGUIMIENTO DE LA FASE PORTADORA.**

El seguimiento de fase de las portadoras de las señales de GPS ha revolucionado la vigilancia de la superficie terrestre. No es necesario disponer de visual a lo largo de la superficie para un posicionamiento preciso. La posición puede ser medida hasta una distancia de 30 km desde un

punto de referencia sin necesidad de puntos intermedios. Este uso del GPS requiere receptores equipados con seguimiento de portadora especiales. Las portadoras L1 y/o L2 son usadas en este tipo de vigilancias. La portadora L1 tiene una longitud de onda de 19.4 centímetros. Si seguimos y medimos esta portadora puede proporcionar rangos de medida con precisión relativa en torno a milímetros trabajando bajo condiciones especiales. El seguimiento de la portadora imposibilita la transmisión de información. Las señales, aunque son remoduladas con códigos binario de tiempo, no incluyen información que puedan distinguir unos ciclos de otros. Las medidas usadas en seguimiento de fase son diferenciadas en ciclos de portadora y pequeñas fracciones de ciclo en el tiempo. Al menos 2 receptores siguen las portadoras al mismo tiempo. El retraso ionosférico en ambos receptores debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar que los ciclos de portadora son contados correctamente. Esto normalmente requiere que ambos receptores se encuentren a una distancia máxima de unos 30 km. La fase de la portadora es seguida en ambos receptores y los cambios en la fase son registrados a lo largo del tiempo de ambos receptores.

#### **DIFERENCIAS DOBLES.**

La gran parte del error en el que se incurre cuando se realiza una medición autónoma, es producido por las imperfecciones en los relojes del satélite y el receptor. Una manera de evitar este error es utilizar una técnica conocida como *Diferencia Doble*. Si dos receptores GPS realizan mediciones a dos satélites diferentes, las diferencias de tiempo entre los receptores y los satélites se cancelan, eliminando cualquier fuente de error que pudieran introducir la ecuación. El post procesamiento de los registros de seguimiento de fase puede proporcionar posición de 1 a 5 centímetros con distancias de 30 km y periodos de medida entre 15 minutos (para 10 km) y una hora (30 km).

#### **AMBIGUEDADES Y RESOLUCION DE AMBIGUEDADES.**

Después de eliminar los errores del reloj con el método de las dobles diferencias se puede determinar el número entero de longitudes de onda más la fracción de longitud de onda entre el satélite y la antena del receptor. El problema radica en la existencia de muchos “juegos” posibles de longitudes de ondas enteras para cada satélite, de aquí que la solución sea ambigua. Mediante procesos estadísticos se puede resolver esta ambigüedad y determinar la solución más probable.

#### **7.5.- TIPOS DE LEVANTAMIENTOS CON GPS**

En la práctica, los procedimientos empleados en levantamientos GPS dependen de la capacidad de los receptores usados y del tipo de levantamiento. Algunos procedimientos específicos de campo actualmente en uso son los métodos: estático, estático rápido, cinemática, pseudocinemático y el cinemático en tiempo real. Estos métodos se describirán en este capítulo. Cada uno se basa en mediciones de fases de la onda portadora y usan técnicas de posicionamiento relativo o sea, 2 o más receptores ubicados en estaciones diferentes, hacen observaciones simultáneas de varios satélites.

##### **LEVANTAMIENTO GPS ESTÁTICO.**

Este fue el primer método en ser desarrollado para levantamientos con GPS y puede ser utilizado para la medición de líneas base largas (generalmente 20 km o más). Para obtener la precisión máxima necesaria por ejemplo en los levantamientos de control geodésico, los procedimientos GPS estático son los que se emplean. Se usan 2 o más receptores y el proceso comienza con uno situado en una estación de control existente y cuyas coordenadas son conocidas con precisión en el sistema de coordenadas WGS84 éste es conocido como el receptor de referencia, y el otro en el primer

punto desconocido y es colocado en el otro extremo de la línea base el cual será conocido como receptor móvil. Se hacen observaciones simultáneas desde ambas estaciones a 4 o más satélites durante una hora o más, dependiendo de la longitud de la línea base. (líneas base muy grandes requieren mayor tiempo de observación). Es importante que los datos sean registrados con la misma frecuencia en cada estación.



El intervalo de registro puede ser establecido en 15, 30 ó 60 segundos. Los receptores deben registrar datos durante un cierto periodo de tiempo el cual dependerá de la longitud de la línea base, el número de satélites observados y la geometría (dilución de la precisión o DOP). Por lo general el tiempo de observación deberá ser por lo menos de una hora para una línea de 20 Km., con 5 satélites y un PDOP prevaeciente de 5. una vez que se ha registrado suficiente información, los receptores se apagan, el móvil se puede desplazar para medir la siguiente línea base y volver a comenzar la medición, es muy importante que exista redundancia en la red o líneas que se están midiendo. La mayoría de los receptores tienen una memoria interna para almacenar los datos observados. Cuando se han hecho todas las mediciones, los datos se transfieren a una computadora para su pos-procesamiento. El pos-procesamiento de los datos de levantamiento GPS estáticos usan normalmente las efemérides radiodifundidas, pero si se desea, pueden usarse las efemérides precisas para obtener un mayor grado de precisión. Las diferencias de coordenadas entre estaciones se calculan comenzando desde la primera estación de control, se suman progresivamente para obtener las estaciones de todas las coordenadas, incluyendo la de control de cierre. Cualquier error de cierre se ajusta a lo largo de la red. Las precisiones relativas alcanzadas con este método son en general de aproximadamente  $\pm 5\text{mm} + 1\text{ppm}$ .

### **LEVANTAMIENTOS GPS ESTATICOS RAPIDOS.**

En los levantamientos estáticos rápidos, se elige un punto de referencia y uno o más móviles operan con respecto a él. Típicamente se utiliza el método estático Rápido para aumentar la densidad de redes existentes, para establecer control, etc.

Cuando se inicia el trabajo donde no se ha llevado a cabo ningún levantamiento con GPS, la primera tarea es la de observar un cierto número de puntos cuyas coordenadas sean conocidas con precisión

en el sistema de coordenadas locales. Esto permitirá calcular la transformación y de allí todos los puntos medidos con GPS pueden ser convertidos con facilidad al sistema local. Se deben observar por lo menos 4 puntos en el perímetro del área de interés. La transformación calculada será válida para el área incluida entre esos puntos. El receptor de referencia se ubica por lo general sobre un punto conocido y puede ser incluido en los cálculos de los parámetros de transformación, si no se conoce ningún tipo, puede ser ubicado en cualquier lugar de la red. El receptor (o los receptores móviles, serán colocados entonces en cada punto conocido. El periodo de tiempo que los móviles deberán observar en cada punto, depende de la longitud de la línea base desde la referencia y también del GDOP. Los datos son registrados en campo para después ser procesados en la oficina. Se deben efectuar verificaciones para asegurarse que no presentan errores gruesos en las mediciones. Esto se puede hacer midiendo los puntos nuevamente en un momento diferente del día. Cuando se trabaja con 2 o más móviles, es necesario asegurarse que todos los receptores están operando simultáneamente sobre cada punto ocupado. Esto permite que los datos de cada estación pueden ser utilizados como referencia o como móvil, esta es la manera más eficiente de trabajar, pero también la más difícil de sincronizar. Otra manera de conseguir redundancia es colocando 2 estaciones de referencia y utilizar un móvil para ocupar los puntos.

#### **LEVANTAMIENTOS CINEMATICOS.**

La técnica cinemática se utiliza generalmente para levantamientos de detalle, registro de trayectorias, etc. Aunque con la implementación del RTK su popularidad ha disminuido. La técnica involucra un móvil que se desplaza y cuya posición puede ser calculada en relación con la referencia.

Primero, el móvil tiene que realizar el procedimiento conocido como iniciación. Esto es lo mismo que medir un punto con estático rápido y permite al programa de post-proceso resolver las ambigüedades cuando se regresa a gabinete.



La referencia y el móvil se activan y permanecen absolutamente estáticos entre 5 y 20 minutos registrando datos (el tiempo depende de la longitud de la línea base desde la referencia y del número de satélites observados). Después de este periodo, el móvil se puede mover libremente, el usuario puede registrar posiciones con un intervalo de tiempo predeterminado, puede registrar otras posiciones o una combinación de las 2. Esta parte de la medición se conoce comúnmente como la cadena cinemática. Una advertencia importante cuando se opera en levantamientos cinemáticos es que hay que evitar moverse muy cerca de objetos que pudieran bloquear las señales de los satélites del receptor móvil. Si en algún punto del móvil rastrea menos de 4 satélites, hay que detenerse, desplazarse a una posición donde se registren 4 o más satélites y realizar nuevamente la iniciación antes de continuar.

### **CINEMATICO OTF (On The Fly).**

Es una variable de la técnica cinemática, en la cual no es necesaria la iniciación subsecuente cuando el número de satélites observados desciende a menos de 4. El método Cinemático OTF es un método de procesamiento que se aplica a la medición durante el post-proceso, al inicio de la medición el operador puede comenzar a caminar con el receptor móvil y registrar datos. Si camina bajo un árbol y pierde la señal de los satélites, el sistema se volverá a iniciar automáticamente al momento de tener suficiente cobertura de satélites.

### **LEVANTAMIENTOS CINEMATICO EN TIEMPO REAL (RTK).**

El Cinemático en Tiempo Real (por sus siglas en inglés Real Time Kinematic). Es un tipo de levantamiento al vuelo efectuado en tiempo real. La estación de referencia tiene un radio de enlace conectado y retransmite los datos que recibe de los satélites. El móvil también tiene un radio de enlace y recibe la señal transmitida de la referencia. Este receptor también recibe los datos de los satélites directamente desde su propia. Estos dos conjuntos de datos pueden ser procesados juntos en el móvil para resolver las ambigüedades y obtener una posición muy precisa en relación con el receptor de referencia. Una vez que el receptor de referencia se ha instalado y está transmitiendo datos mediante el radio de enlace, se puede activar el receptor móvil, cuando está rastreando satélites y recibiendo datos de la referencia, puede empezar con el proceso de inicio. Esto es similar al proceso de inicio realizado en un levantamiento cinemático OTF con post-proceso, la diferencia principal es que el proceso se realiza en tiempo real.



Una vez que se ha completado el inicio, las ambigüedades son resueltas y el móvil puede registrar puntos y sus coordenadas. En este punto, las precisiones de las líneas base serán del orden de 1 - 5 cm. Es importante mantener contacto con el receptor de referencia, de otra manera el móvil puede perder la ambigüedad. Si esto sucede la posición calculada es mucho menos precisa. Además se pueden presentar problemas cuando se mide cerca de obstrucciones tales como edificios, árboles, etc., ya que la señal de los satélites puede ser bloqueada.

El RTK se está convirtiendo en el método más común para realizar levantamientos GPS de alta precisión en áreas pequeñas y puede ser utilizado en aplicaciones donde se utilizan las estaciones totales convencionales. Esto incluye levantamientos de detalles, estaqueo, replanteo, aplicaciones COGO, etc.

### **EL RADIO ENLACE.**

La mayoría de los sistemas RTK GPS emplean pequeños radio módems UHF, muchos de los usuarios experimentan problemas con la radio comunicación del sistema RTK. Por lo tanto vale la pena considerar los siguientes factores al tratar de optimizar el desempeño del radio.

- 1.- La potencia del radio transmisor. En términos generales, a mayor potencia mayor rendimiento. Sin embargo la mayoría de los países restringe legalmente la potencia de salida entre 0.5 – 2.0 W.
- 2.- La altura de la antena del transmisor. Las comunicaciones por radio pueden ser afectadas por la falta de línea de visibilidad. Cuanto más alto se pueda instalar la antena, menores serán los problemas por la falta de línea de visibilidad y aumentará el alcance de las comunicaciones por radio. El mismo principio se aplica para la antena receptora. Otros factores que afectan el rendimiento incluyen la longitud del cable de antena, ya que cuanto más largo sea este, se presentarán más pérdidas. Así mismo el tipo de antena también influye en el alcance.

**7.6.- APLICACIONES DEL SISTEMA GPS**

Son múltiples los campos de aplicación de los sistemas de posicionamiento tanto como sistemas de ayuda a la navegación, como en modelización espacio atmosférico y terrestre o aplicaciones con requerimientos de alta precisión en la medida del tiempo. A continuación se detallan algunos de los campos civiles donde se utilizan en la actualidad sistemas GPS:

**ESTUDIO DE FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS.**

Cuando la señal GPS atraviesa la troposfera el vapor de agua, principal causante de los distintos fenómenos meteorológicos, modifica su velocidad de propagación. El posterior análisis de la señal GPS es de gran utilidad en la elaboración de modelos de predicción meteorológica.

**LOCALIZACIÓN Y NAVEGACIÓN EN REGIONES INHÓSPITAS.**

El sistema GPS se utiliza como ayuda en expediciones de investigación en regiones de difícil acceso y en escenarios caracterizados por la ausencia de marcas u obstáculos. Un ejemplo son los sistemas guiados por GPS para profundizar en el conocimiento de las regiones polares o desérticas.

**MODELOS GEOLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS.**

Los geólogos comenzaron a aplicar el sistema GPS en los 80 para estudiar el movimiento lento y constante de las placas tectónicas, para la predicción de terremotos en regiones geológicamente activas. En topografía, el sistema GPS constituye una herramienta básica y fundamental para realizar el levantamiento de terrenos y los inventarios forestales y agrarios.

**INGENIERÍA CIVIL.**

En este campo se utiliza la alta precisión del sistema GPS para monitorizar en tiempo real las deformaciones de grandes estructuras metálicas o de cemento sometidas a cargas.

**SISTEMAS DE ALARMA AUTOMÁTICA.**

Existen sistemas de alarma conectados a sensores dotados de un receptor GPS para supervisión del transporte de mercancías tanto contaminantes de alto riesgo como perecederos (productos alimentarios frescos y congelados). En este caso la generación de una alarma permite una rápida asistencia al vehículo.

**SINCRONIZACIÓN DE SEÑALES.**

La industria eléctrica utiliza el GPS para sincronizar los relojes de sus estaciones monitoras a fin de localizar posibles fallos en el servicio eléctrico. La localización del origen del fallo se realiza por triangulación, conociendo el tiempo de ocurrencia desde tres estaciones con relojes sincronizados.

**GUIADO DE DISMINUIDOS FÍSICOS.**

Se están desarrollando sistemas GPS para ayuda en la navegación de inválidos por la ciudad. En esta misma línea, la industria turística estudia la incorporación del sistema de localización en guiado de visitas turísticas a fin de optimizar los recorridos entre los distintos lugares de una ruta.

**NAVEGACIÓN Y CONTROL DE FLOTAS DE VEHÍCULOS.**

El sistema GPS se emplea en planificación de trayectorias y control de flotas de vehículos. La policía, los servicios de socorro (bomberos, ambulancias), las centrales de taxis, los servicios de

mensajería, empresas de reparto, etc. organizan sus tareas optimizando los recorridos de las flotas desde una estación central. Algunas compañías ferroviarias utilizan ya el sistema GPS para localizar sus trenes, máquinas locomotoras o vagones, supervisando el cumplimiento de las señalizaciones.

### **SISTEMAS DE AVIACIÓN CIVIL.**

En 1983 el derribo del vuelo 007 de la compañía aérea coreana al invadir cielo soviético, por problemas de navegación, acentuó la necesidad de contar con la ayuda de un sistema preciso de localización en la navegación aérea. Hoy en día el sistema GPS se emplea en la aviación civil tanto en vuelos domésticos, transoceánicos, como en la operación de aterrizaje. La importancia del empleo de los GPS en este campo ha impulsado, como se verá en la siguiente sección, el desarrollo en Europa, Estados Unidos y Japón de sistemas orientados a mejorar la precisión de los GPS.

### **NAVEGACIÓN DESASISTIDA DE VEHÍCULOS.**

Se están incorporando sistemas DGPS como ayuda en barcos para maniobrar de forma precisa en zonas de intenso tráfico, en vehículos autónomos terrestres que realizan su actividad en entornos abiertos en tareas repetitivas, de vigilancia en medios hostiles (fuego, granadas, contaminación de cualquier tipo) y en todos aquellos móviles que realizan transporte de carga, tanto en agricultura como en minería o construcción. La alta precisión de las medidas ha permitido importantes avances en el espacio en órbitas bajas y así tareas de alto riesgo de inspección, mantenimiento y ensamblaje de satélites artificiales pueden ahora realizarse mediante robots autónomos

## **CAPITULO 8.- REDES GEODESICAS.**

### **8.1.- INTRODUCCION.**

El establecimiento de *redes geodésicas* es uno de los objetivos principales que se persiguen con la Geodesia, pues en ellas se basará una gran cantidad de estudios y trabajos posteriores (levantamientos topográficos, etc.).

Las redes geodésicas consisten básicamente en una serie de puntos distribuidos por toda la superficie de un país, formando una malla de triángulos, en los cuales, tras un proceso de complejos cálculos, se conocen todos sus elementos, incluyendo las coordenadas de todos sus vértices, a los que denominaremos *vértices geodésicos*.

Para determinar las coordenadas de los vértices geodésicos se parte de las del Punto Astronómico Fundamental, que se determinan por métodos exclusivamente astronómicos, como ya hemos dicho anteriormente. Posteriormente, se irán determinando el resto de puntos mediante visuales que formen una malla triangulada. Es necesario medir, con la máxima precisión, los tres ángulos de cada triángulo (triangulación), además de una línea determinada por dos vértices que suele tomarse hacia el centro del país, denominándose *base*, que, como su propio nombre indica, es la base de toda la red geodésica, razón por la cual es imprescindible establecerla con absoluta precisión, muy por encima de la que estamos acostumbrados a obtener en los trabajos topográficos convencionales. A partir de la base, que constituye el lado de uno de los triángulos, y de la medición de los ángulos, se van determinando el resto de coordenadas, teniendo en cuenta que estos triángulos están sobre el

Elipsoide y sus lados serán líneas geodésicas (lo que complica los cálculos enormemente), y apoyándose unos triángulos en otros.

La Geodesia también necesita conocer la orientación, y se determina, en cada punto geodésico, la dirección Norte-Sur, que es la intersección del plano horizontal, tangente al elipsoide en ese punto y el plano del meridiano que pasa por el mismo punto. Esta línea se llama meridiana. El ángulo que forma la meridiana con una dirección dada del terreno se llama acimut de dicha dirección.

Para evitar en lo posible la lógica acumulación de errores que supone el cálculo de unos triángulos apoyados en los anteriores, se establecen redes geodésicas de distinta precisión u orden. Generalmente se disponen redes de primero, segundo y tercer orden, con precisiones progresivamente decrecientes.

## 8.2.- SISTEMA GEODESICO NACIONAL

Cualquier punto situado sobre la superficie de la Tierra tiene una Referencia Geodésica, que consiste en algún tipo de coordenadas ligadas a un Marco de Referencia Espacial, el cual está constituido por las Redes Geodésicas que tienden a definirse en un sistema único y global.

México tiene su propia red geodésica, que es administrada por el INEGI.

### RED GEODÉSICA NACIONAL

Se define como Red Geodésica Nacional al conjunto de puntos situados sobre el terreno, dentro del ámbito del territorio nacional, establecidos físicamente mediante monumentos más o menos permanentes sobre los cuales se han hecho medidas directas y de apoyo de parámetros físicos que permiten su interconexión y la determinación de su posición y altura geográfica, así como del campo gravimétrico externo asociado, con relación al sistema de referencia considerado.

Existen tres vertientes de este sistema:

- 1 Red Geodésica Horizontal
- 2 Red Geodésica Vertical
- 3 Red Geodésica Gravimétrica

Para los efectos del punto anterior, se adopta como Sistema nacional el conceptualizado por la Asociación Internacional de Geodesia a través del Sistema Geodésico de Referencia 1980 (GRS80) que está definido por los siguientes parámetros:

|                                         |          |                                                            |
|-----------------------------------------|----------|------------------------------------------------------------|
| Semieje mayor                           | $a$      | 6 378 137 m                                                |
| Velocidad angular                       | $\omega$ | $7\,292\,115 \times 10^{-11}$ rad/seg                      |
| Constante gravitacional geocéntrica     | $GM$     | $3\,986\,005 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /seg <sup>2</sup> |
| Factor dinámico de forma no normalizado | $J_2$    | $108\,263 \times 10^{-8}$                                  |

Las principales constantes geométricas y físicas derivadas son:

|                                                                                       |            |                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|
| Semieje menor                                                                         | b          | 6 356 752.314 1 m    |
| Excentricidad lineal                                                                  | E          | 521 854.009 7 m      |
| Radio polar                                                                           | c          | 6 399 593.625 9 m    |
| Primera excentricidad al cuadrado                                                     | $e^2$      | 0.006 694 380 022 90 |
| Segunda excentricidad al cuadrado                                                     | $e'^2$     | 0.006 739 496 775 48 |
| Achatamiento                                                                          | f          | 0.003 352 810 681 18 |
| Recíproco del achatamiento                                                            | $f^{-1}$   | 298.257 222 101      |
| Cuadrante meridiano                                                                   | Q          | 10 001 965.729 3 m   |
| Radio medio                                                                           | R1         | 6 371 008.771 4 m    |
| Radio de la esfera de la misma superficie                                             | R2         | 6 371 007.181 0 m    |
| Radio de la esfera del mismo volumen                                                  | R3         | 6 371 000.790 0 m    |
| Gravedad normal en el Ecuador                                                         | $\gamma_e$ | 978 032.677 15 mGals |
| Relación de la aceleración centrífuga con respecto a la gravedad normal en el Ecuador | $m'$       | 0.003 449 786 003 08 |

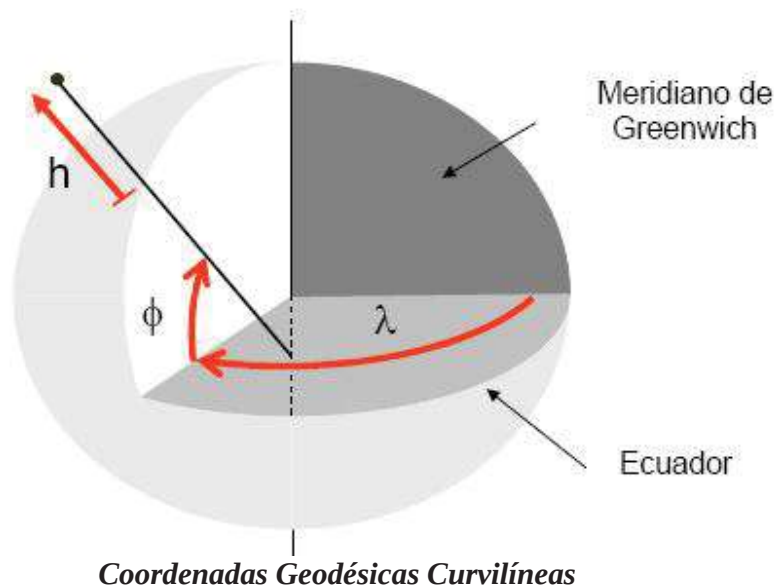
### 8.2.1. - LA RED GEODÉSICA NACIONAL HORIZONTAL GENERALIDADES.

La cartografía formal y los grandes proyectos de ingeniería requieren ubicarse dentro de un determinado marco de referencia que permita definir inequívocamente y con precisión los diversos rasgos y obras de interés; para ello primero es necesario crear una cadena de puntos interconectados y procesar los datos de manera conjunta a fin de determinar su posición relativa para formar una red primaria de posicionamiento geodésico.

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al Marco de Referencia ITRF92.

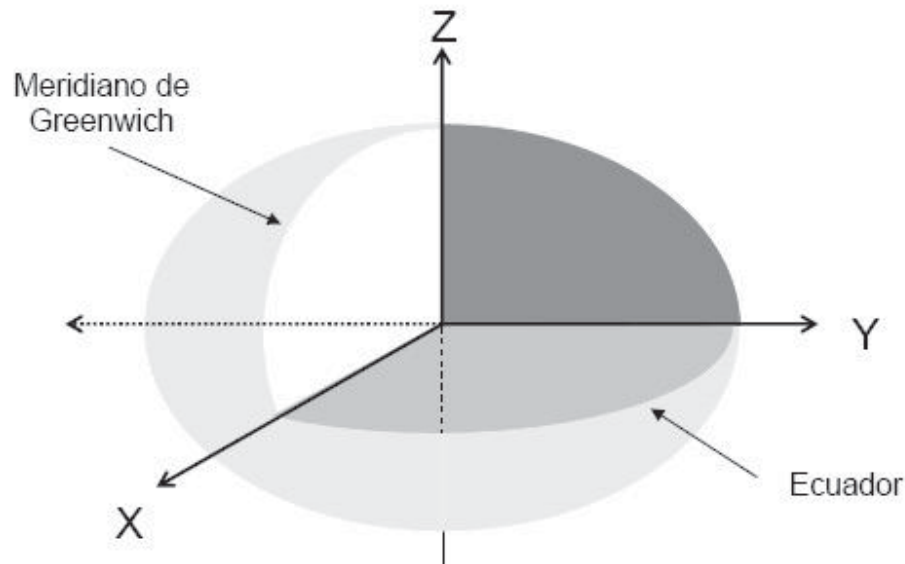
El sistema coordenado usado para medir la posición de un punto sobre la esfera de la Tierra es por medio de la determinación de la Latitud, Longitud y Altura. El término genérico de este tipo de coordenadas es "Coordenadas Geográficas", sin embargo para usuarios más especializados que requieren las posiciones calculadas sobre un elipsoide matemático específico, por ejemplo el Elipsoide de Clarke 1866 o GRS80, el "término geográfico" está especificado a un "término geodésico".

La posición horizontal de un punto [Figura siguiente], se representa por la latitud geodésica ( $\phi$ ), definida como el ángulo entre la normal al elipsoide que pasa por el punto en cuestión y el Ecuador; y por la longitud geodésica ( $\lambda$ ), definida por el ángulo diedro formado por el plano del meridiano de Greenwich y el plano del meridiano que contiene al punto. En el caso de los levantamientos tridimensionales, se podrá considerar la altura geodésica (h), la cual se define como la distancia entre el elipsoide de referencia y el punto en cuestión, medida a lo largo de la normal al elipsoide.



En el Sistema Cartesiano Tridimensional [Figura siguiente], definido en el ITRF, el origen es el centro de masa de la totalidad de la Tierra, incluyendo los océanos y la atmósfera; la unidad de longitud, es el metro definido por el Sistema Internacional de Unidades, en un marco terrestre local, acorde con la teoría relativista de la gravitación; la orientación de los ejes coordenados, es consistente con el sistema BIH (Oficina Internacional de la Hora, por sus siglas en francés) para la época 1984.0, dentro de  $\pm 3$  milisegundos de arco; la evolución en el tiempo, con relación a la orientación, es tal, que no existe rotación residual relativa con respecto a la corteza terrestre; el eje X, pasa por la intersección del meridiano de referencia con el Ecuador; el eje Y, se escoge de tal forma, que se tenga un sistema dextrógiro o de mano derecha; el eje Z del sistema, pasa por el Polo de Referencia Internacional.

El WGS84, corresponde a una solución desarrollada originalmente por la actual NGIA (anteriormente la DMA), solución que a partir de su concepción, ha ido convergiendo al marco del ITRF. En la actualidad, tanto el WGS84 como el ITRF00, época 2004.0, son prácticamente idénticos desde el punto de vista cartográfico, aunque a favor del ITRF, se puede asegurar que corresponde a una solución bastante más fuerte, por haber integrado componentes de una muy alta exactitud.



### ***Coordenadas Cartesianas Tridimensionales***

Los levantamientos geodésicos horizontales son aquellos que comprenden una serie de medidas efectuadas en el campo, cuyo propósito final consiste en determinar las coordenadas geodésicas (geográficas) de puntos situados sobre la superficie terrestre. Las mediciones se llevan a cabo por medio del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

La Red Geodésica Horizontal ofrece a usuarios internos y externos información de estaciones geodésicas clasificadas en:

- 1 Red Geodésica Tradicional ó Pasiva (RGNP)
- 2 Red Geodésica Nacional Activa (RGNA)

Ambas permiten que los usuarios deriven a partir de ellas nuevos puntos mediante levantamientos geodésicos.

La Red Tradicional, conocida como Red Geodésica Nacional Pasiva, (RGNP) está constituida por 55 324 vértices geodésicos distribuidos en la República Mexicana, dichos vértices reciben el nombre de "estaciones GPS" y están materializados sobre el terreno, con una placa empotrada que identifica al punto. Las coordenadas que definen su posición han sido generadas a partir de levantamientos utilizando el Sistema de Posicionamiento Global, lo cual las dota de valores de posición referidas al elipsoide GRS80.

Aquellos usuarios que cuenten con equipo tradicional (teodolitos, distanciómetro o estaciones totales) pueden situarse sobre un vértice de esta Red y efectuar sus mediciones de campo, para lo cual deben introducir las coordenadas del vértice GPS, como referencia o punto de partida con el fin de generar las coordenadas de los nuevos puntos de interés.

Cuando se derivan coordenadas con instrumentos tradicionales, serán definidas como el tipo de coordenadas del sistema de referencia origen en levantamientos clasificados como topográficos.

La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) está conformada por un conjunto de 15 estaciones fijas distribuidas estratégicamente a lo largo del territorio nacional, dichas estaciones monitorean de

manera continua la constelación del sistema GPS. En este sentido, la estación de la RGNA que se ocupa durante un levantamiento geodésico, desempeña un papel activo, puesto que ya no solamente se emplean las coordenadas de dicha estación para determinar la posición del nuevo punto, relativa a ésta, sino que también se utilizan los datos derivados en ella de las observaciones a los satélites; así, esta Red ofrece información geodésica acorde a las precisiones que proporcionan los modernos equipos de posicionamiento global GPS.

Se entiende pues que está dirigida a aquellos usuarios que dispongan de equipo GPS para la realización de trabajos de posicionamiento y que deseen efectuar ligas diferenciales al servicio que ofrece el INEGI mediante las estaciones de monitoreo permanente. La utilización de la información que proporciona la RGNA permite a los usuarios internos y externos ahorrarse el desplazamiento al terreno de más de un equipo GPS al efectuar sus levantamientos, ganando en precisión, tiempo y costo.

### **APLICACIONES**

- 1 Determinación de la posición geodésica de monumentos internacionales que definen las fronteras de México con los países vecinos.
- 2 Servicio geodésico para dar cumplimiento de las obligaciones que de conformidad con la convención de las Naciones Unidas se tienen sobre el derecho del mar patrimonial; zona económica exclusiva, los espacios marítimos que se quieran reivindicar más allá de las 200 millas.
- 3 Apoyo geodésico necesario para trabajos fotogramétricos, ya que la geodesia es el sustento que les permite orientar y escalar los modelos estereoscópicos.
- 4 Ejecución de los trabajos geodésicos para la delimitación de las fronteras marítimas y ubicación de monumentos internacionales.
- 5 Ejecución de trabajos geodésicos requeridos por las dependencias de la Federación y gobiernos estatales y municipales para el estudio y definición de sus límites político-administrativos.
- 6 Realización de los trabajos geodésicos necesarios para el control y la ubicación del territorio insular mexicano.
- 7 Acercamiento de la Red Geodésica a las zonas de alto y mediano desarrollo para el control de las obras de ingeniería y levantamientos que se realicen.
- 8 Acercamiento de líneas de base necesarias para la actualización de cartografía urbana por métodos GPS

### **LA RED GEODÉSICA NACIONAL ACTIVA**

La RGNA, está conformada originalmente por 15 estaciones, que pueden considerarse como estaciones fiduciales y de monitoreo para los efectos de la definición posicional del territorio nacional, detección y registro de los cambios asociados al ITRF, como apoyo a los usuarios en sus levantamientos geodésicos y como base para el desarrollo de la Red Geodésica Nacional Pasiva; las estaciones de la RGNA, se encuentran ubicadas, de modo que cualquier punto del territorio nacional se encuentra a no más de 500 Kilómetros de dos estaciones. Las estaciones se encuentran dentro del estándar de exactitud posicional de 5 centímetros, y registran a intervalos de 15 segundos, durante las 24 horas del día, la información de las dos frecuencias transmitidas por los satélites de la constelación NAVSTAR, que forman el sector espacial del GPS. El nombre y ubicación en el país

de dichas estaciones, se presenta en la Tabla 6.1, la denominación y posición geodésica de cada una de ellas.

### RED GEODESICA NACIONAL ACTIVA



La RGNA, proporciona el estándar de exactitud posicional más alto disponible actualmente en México, para referenciar todos los trabajos de posicionamiento geodésico, que realizan las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, en el Marco ITRF00 época 2004.0; constituye la base posicional única y consistente para el levantamiento de nuevos vértices geodésicos en el territorio nacional.

La RGNA, se caracteriza por tener una exactitud compatible con las tecnologías modernas de posicionamiento y facilita el uso de éstas, al compartir los datos para georreferenciación espacial, entre usuarios de diversos sectores de la actividad geográfica y reducir significativamente los costos para la elaboración de trabajos que requieran conocer la ubicación de puntos y las relaciones geométricas que existan entre ellos. Se prevé un crecimiento en el número de estaciones conforme otras instituciones y organismos gubernamentales instalen estaciones permanentes del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS por sus siglas en inglés) y convengan en integrarse a la Red.

Para el establecimiento de la RGNA, se contó con la colaboración del NGS de los Estados Unidos de América para lo cual se efectuaron conexiones a estaciones VLBI, a fin de alcanzar la máxima

exactitud posible. El VL BI es un sistema que mide las diferencias de señales de microondas de fuentes de radio extragalácticas, recibidas por dos o más radiotelescopios que pueden estar muy lejanos unos de otros. El sistema es el único capaz de medir todas las componentes de orientación terrestre en forma simultánea y con toda exactitud. Hoy en día, la determinación de coordenadas de sitios terrestres, pueden hacerse con este sistema de manera rutinaria y regular, con exactitudes estimadas de unos 0.2 de milisegundos o mejor.

### **LA RED GEODÉSICA NACIONAL PASIVA**

La Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP), está constituida por puntos geodésicos distribuidos a lo largo de la República Mexicana, con la denominación común de “estaciones GPS”. Los puntos se encuentran materializados sobre el terreno, mediante mojones, monumentos o partes de estructuras sólidas, con una placa metálica empotrada, que identifica la ubicación precisa del punto. Así deberán continuar materializándose en el futuro, mediante las operaciones de densificación de la Red.

Las coordenadas que definen la posición de cada vértice, se han generado a partir de levantamientos geodésicos, que emplean el GPS y se encuentran ligados a la RGNA, lo cual, los dota de valores de posición referidos al Marco ITRF00 época 2004.0

Los levantamientos que se hagan en lo sucesivo, para la densificación de la RGNP, deberán estar igualmente ligados a la RGNA en el Marco ITRF00 época 2004.0

Las coordenadas e información general sobre los vértices de la RGNP, podrán ser consultadas en la dirección de Internet [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx), en el rubro de información geográfica.

### **MÉTODOS PARA OBTENER POSICIONAMIENTO HORIZONTAL.**

Los levantamientos geodésicos horizontales, son aquellos que comprenden una serie de medidas efectuadas en el terreno, cuyo propósito final, consiste en determinar las coordenadas geodésicas horizontales, de puntos situados sobre la superficie terrestre.

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al Marco de Referencia Terrestre Internacional definido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y de Sistemas de Referencia para el año 2000, con datos de la época 2004.0, denominado ITRF00 época 2004.0, asociado al Sistema de Referencia Geodésico de 1980. Este es el Marco de Referencia oficial para México.

El SIRGAS, recomendado para ser adoptado por todos los países del continente durante la séptima Conferencia Cartográfica Regional de las Naciones Unidas para las Américas (Nueva York, enero de 2001), que servirá de base geodésica referencial, para la construcción de la Infraestructura de Datos Espaciales de las Américas, es totalmente compatible desde el punto de vista cartográfico, con el Sistema Geodésico Horizontal definido en esta norma, por lo que solamente, en aquellos casos en que sea requerida una muy alta exactitud posicional se deberá realizar la transformación entre los sistemas en cuestión.

Estos levantamientos permiten que la Geodesia no solo se oriente a la determinación de la figura de la Tierra, sino también a la ejecución de medidas sobre la superficie de la misma, para establecer las relaciones de posición en que se ubican los accidentes topográficos. A estas mediciones sobre la superficie, se les llama levantamiento topográfico. Así tenemos que los levantamientos pueden ser topográficos o geodésicos. Los primeros se calculan como si la superficie terrestre fuera plana y los segundos consideran la curvatura de la Tierra.

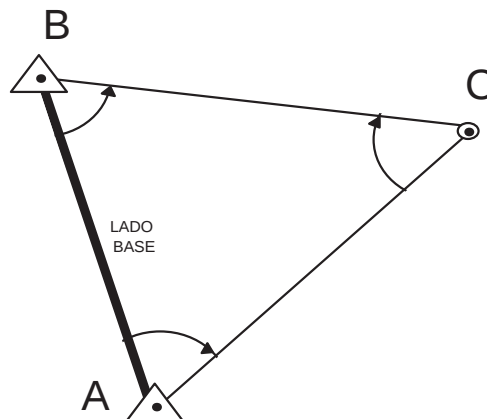
El control horizontal inicia en un punto o puntos de posición conocida, desde los cuales se miden distancias y ángulos a los nuevos puntos, cuyas posiciones se calculan luego por medio de los valores medidos. Existen diversos métodos para llevar a cabo levantamientos horizontales, los más comunes son los que se explican a continuación:

### **POLIGONACIÓN**

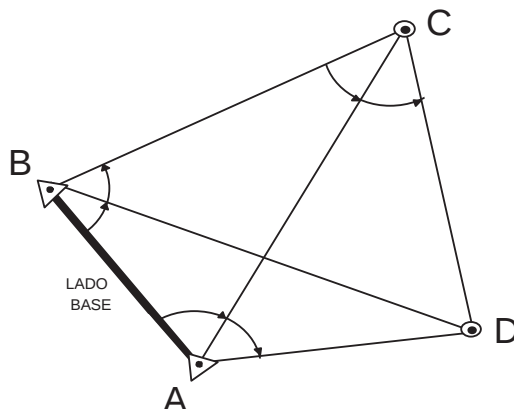
Consiste en medir a partir de una posición o punto conocido hacia otro punto, midiendo los ángulos y distancias a lo largo de una serie de puntos del levantamiento. Así, con las medidas angulares puede calcularse la dirección de cada lado de la poligonal y con las medidas de longitud de las líneas, se calcula la posición de cada uno de los puntos de la poligonal.

### **TRIANGULACIÓN**

Es el método más común para realizar levantamientos geodésicos que básicamente consisten en la medición de los ángulos interiores de los triángulos. Si la distancia de un lado de uno de los triángulos y todos los ángulos interiores son medidos, entonces se pueden calcular los otros dos lados. De igual forma, si se conocen la latitud y longitud de uno de los puntos extremos de un lado, así como su distancia y dirección, se podrá calcular la latitud y longitud del otro punto extremo. El lado del triángulo que se ha medido se llama lado base.



Al llevar a cabo levantamientos para cubrir zonas o áreas, se utilizan las medidas de los lados base de una red de triangulación, además de las medidas angulares de todos los triángulos, logrando con esto calcular los datos restantes. Conociendo la latitud y longitud de los extremos de la línea base, así como el ángulo y la distancia del siguiente lado base, se puede calcular la latitud y longitud de cada vértice de los triángulos.



VALORES CONOCIDOS:

Latitud y longitud de los puntos A y B  
Distancia de la línea AB  
Acimut de la línea AB

### TRILATERACIÓN

Es un método de levantamiento a base de triángulos interconectados, que forman cadenas, de los cuales se miden las distancias de cada lado así como algunos ángulos, con lo cual se pueden determinar las coordenadas de los vértices de los triángulos.

### METODO ASTRONÓMICO

Para efectos de definición se entenderá como método astronómico al conjunto de operaciones de campo y gabinete destinado a obtener las coordenadas astronómicas y/o la dirección entre puntos situados sobre la superficie terrestre, mediante la observación de la posición angular de objetos relativamente fijos sobre la esfera celeste cuyas coordenadas se conocen en el tiempo. El método deberá aplicarse para la determinación de las coordenadas astronómicas de latitud y longitud, con propósitos de control de las correspondientes coordenadas geodésicas obtenidas por otros métodos de levantamiento, para investigaciones relacionadas con el Dátum local y su establecimiento, para el control de la dirección de otros levantamientos y para la definición de las desviaciones de la vertical.

Por su propia naturaleza, debe considerarse al astronómico como un método de apoyo a otros levantamientos y no estrictamente como un método de levantamiento que pueda utilizarse con fines de cubrimiento extensivo, por lo que dentro de los diversos métodos de levantamiento geodésico horizontal su función primordial es de control azimutal.

En adición a las observaciones angulares requeridas, toda determinación astronómica normalmente incluye la hora de observación de cada lectura angular que se haga a los objetos celestes, para lo cual se deberá contar con un sistema de control del tiempo que permita resolverlo con una aproximación mejor que 0.1 segundo.

**TÉCNICAS DIFERENCIALES DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.**

Este método consiste en recibir la señal electromagnética emitida por los satélites de la constelación NAVSTAR que conforman el Sistema de Posicionamiento Global para determinar la posición relativa de puntos sobre la superficie terrestre. Dada la complejidad, el tamaño y dinámica de cambio de las normas para este tipo de levantamientos se tratarán a detalle en un documento por separado, dándose en éste los lineamientos mínimos.

**8.2.2. - SISTEMA GEODÉSICO VERTICAL**

Los levantamientos geodésicos verticales, comprenderán todas aquellas operaciones de campo, dirigidas a determinar la distancia vertical que existe entre puntos situados sobre o cerca de la superficie terrestre y el nivel de referencia adoptado.

El Sistema Geodésico Vertical de México, se encuentra materializado por el conjunto de puntos o Bancos de Nivel que constituyen la Red Geodésica Vertical, representada por mojones, monumentos, o partes de estructuras sólidas, con una placa metálica empotrada, que identifica su ubicación y se encuentran distribuidos en el territorio nacional. La densificación de la Red Geodésica Vertical, deberá seguir materializándose de esta manera.

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido al nivel de referencia vertical, definido por el Dátum Vertical Norteamericano de 1988 (NAVD88), debiéndose expresar los valores de altura en metros en el sistema de alturas ortométricas (H) derivado de los números geopotenciales.

En caso de que se cuente solamente con la altura geodésica o elipsoidal ( $h$ ), ésta, se deberá de transformar a altura ortométrica (H) mediante la generación de la altura geoidal  $N$  a través del modelo geoidal vigente, disponible en el INEGI. La relación entre altura elipsoidal, ortométrica y altura geoidal está dada por:

$$H = h - N$$

La altitud de un punto sobre la superficie terrestre se define como la distancia existente sobre la línea vertical, entre éste y una superficie de referencia (dátum vertical). Su determinación se realiza mediante un procedimiento conocido como Nivelación.

Un dátum vertical es aquella superficie a la cual se refieren las elevaciones. Actualmente la superficie adoptada por México como dátum, es el nivel medio del mar local. Para su determinación precisa se realizaron observaciones continuas de las fluctuaciones de las mareas en estaciones mareográficas.

La Red Geodésica clásica de control vertical se establece mediante Nivelación Geométrica. Esta técnica, se lleva a cabo por medio de métodos ópticos de medición. Por lo tanto, establecer el posicionamiento geodésico vertical consiste en determinar la elevación de puntos convenientemente elegidos y demarcados en el terreno, sobre una superficie de referencia. Estos puntos se integran, dando lugar a las redes de posicionamiento geodésico vertical.

El INEGI ha establecido un marco de referencia vertical que sirve de control básico de alturas. Permanentemente se densifica, y mantiene. El establecimiento de la Red se lleva a cabo mediante el posicionamiento de bancos de nivel (marca permanente de altitud conocida) constituyendo así las líneas de nivelación.

La Red Geodésica Vertical en el país, cuenta con un inventario de 21 000 bancos de nivel de precisión (BNP) espaciados a cada 2 kilómetros en promedio, y 17 000 bancos de nivel topográficos (BNT) aproximadamente.



### **APLICACIONES**

De acuerdo a las características de precisión y densificación de las líneas de nivelación, existen varios usos de las mismas.

- 1 Determinación precisa del relieve del territorio.
- 2 Origen para las grandes obras públicas.
- 3 Establecimiento de la cartografía a cualquier escala necesaria para el ordenamiento territorial.
- 4 Conocimiento muy preciso del nivel medio del mar y sus variaciones a causa del efecto invernadero.
- 5 Detección de posibles variaciones verticales de la corteza en zonas con previsible fenómenos sísmicos y volcánicos.

El equipo que se utiliza son los niveles geodésicos modernos (basculantes y automáticos) que tienen como características y ventajas principales: ser ligeros, precisos, de fácil estacionamiento y observación.

### **FUTURA SUPERFICIE DE REFERENCIA PARA LA DEFINICIÓN DE ALTURAS.**

Toda nivelación clásica parte de un punto de referencia (dátum vertical), el cual, como ya se mencionó, fue determinado mediante la observación del nivel del mar (mareógrafos) en largos periodos de tiempo. Sin embargo, debido al dinamismo oceánico del planeta, el mar presenta diferentes niveles que dependen de la variación temporal de su superficie (presión atmosférica, temperatura oceánica, corrientes marinas y densidad del agua), que se traduce en diferencias de nivel de hasta dos metros entre mareógrafos que han sido instalados bajo condiciones similares.

Para superar los inconvenientes tácticos en la definición vertical sustentada por los mareógrafos, es necesario encontrar una superficie que redefina de manera consistente y homogénea el origen en la medida de las alturas.

Durante los años ochentas las agencias geodésicas de Canadá, Estados Unidos y México, unieron esfuerzos a fin de redefinir las Redes Geodésicas Verticales de los tres países. Adoptándose para ello el dátum definido por nivel medio del mar en un punto de la desembocadura del Río San Lorenzo y denominándolo como Dátum Vertical Norteamericano de 1988 (NAVD88)

El INEGI, ha comenzado los trabajos geodésicos encaminados al cambio y adopción del NAVD88; así, en un futuro, todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido a este Dátum, debiéndose expresar sus valores en el sistema de alturas ortométricas (H).

Por lo tanto, los levantamientos geodésicos verticales comprenderán todas aquellas operaciones de campo dirigidas a determinar la distancia vertical que existe entre puntos situados sobre la superficie terrestre y el nivel de referencia definido por el NAVD88.

### **ANTECEDENTES HISTÓRICOS.**

En el año de 1949 se concertó un convenio de colaboración cartográfica entre México y los estados unidos de Norteamérica para la ejecución de triangulaciones geodésicas, así como nivelación de precisión, celebrándose un segundo acuerdo en 1955 para la continuación de estos trabajos.

Las dependencias encargadas en la realización de estos trabajos fueron, por México, el departamento cartográfico militar (dcm) de la secretaría de la defensa nacional y, por los estados unidos de Norteamérica, el Interamerican Geodetic Survey (IAGS).

Los trabajos de nivelación de precisión se iniciaron en el año de 1952, cubriendo para fines de esa década aproximadamente 12,000 km.

Para el ajuste de estos trabajos se consideraron como elevaciones fijas las de los bancos de nivel referidas al nivel medio del mar determinado por mareógrafos localizados en Mazatlán, Sinaloa, Manzanillo, Col., Acapulco, Gro., Veracruz, Ver., Tampico, Tamps., Guaymas, y Topolobampo, son además, los bancos referidos al nivel medio del mar, dátum de 1929, establecidos por el U.S. Coast and Geodetic Survey (E.U.A.).

En el año de 1969 se estableció un convenio entre la universidad nacional autónoma de México (instituto de geofísica) y el servicio geodésico interamericano (IAGS por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de Norteamérica.

Únicamente se realizaron trabajos de nivelación de precisión, auxiliando en la ejecución de estos levantamientos, personal del departamento cartográfico militar.

A partir de 1968, se creó la comisión de estudios del territorio nacional, hoy y dirección general de geografía del instituto nacional de estadística, geografía e informática, la cual continúa los trabajos de nivelación hasta la fecha. Las nivelaciones fueron ligadas y ajustadas a bancos de nivel establecidos en las etapas anteriores.

### **SITUACION ACTUAL.**

En el 2002: 38792 bancos de nivel en la base de datos geodésicos, 21172 de primer orden y 17620 de tercer orden, con un reporte del 60% de marcas destruidas.

Del 2002 al 2005: 18789 bancos de nivel empotrados, monumentados y recuperados, con más de 30 000 kilómetros.

Del 2003 al 2005: 12217 bancos de nivel medidos.

Del 2002 al 2006: se estima concluir los trabajos de monumentación y nivelación de más de 50 000 kilómetros.

### MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO VERTICAL.

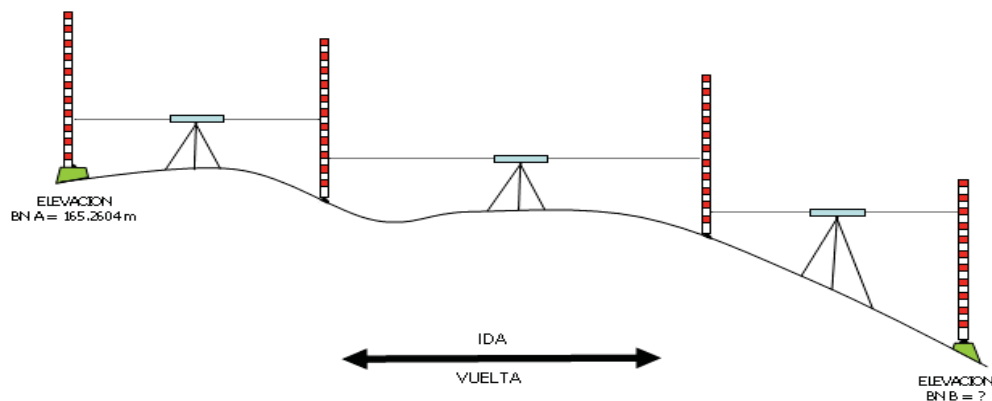
Para los levantamientos geodésicos verticales se podrá utilizar el método de nivelación directa, geométrica o diferencial, o el método de nivelación trigonométrica. La selección de uno, cualquiera de ellos, deberá estar ligada a consideraciones relacionadas con el propósito, utilidad de levantamiento y capacidad relativa para producir los resultados esperados, los que deben formar parte de los criterios contemplados en el pre-análisis y diseño del anteproyecto.

La nivelación directa constituye el método clásico utilizado para el desarrollo de los levantamientos geodésicos verticales, mediante un procedimiento que determina directamente la diferencia de altura entre puntos vecinos, por la medida de la distancia vertical existente entre dichos puntos y un plano horizontal local definido a la altura del instrumento que se utilice para hacer dicha medida.

La nivelación trigonométrica sigue en orden de importancia a la anterior y consiste en la determinación indirecta de diferencias de alturas entre puntos vecinos mediante la medida de la distancia existente entre ambos y del ángulo vertical que contiene a dicha línea, con respecto al plano horizontal local de cualquiera de los puntos. Por su naturaleza indirecta y por estar más afectado por errores sistemáticos que en el caso de nivelación directa, el método trigonométrico es menos preciso y produce resultados menos exactos.

Pero en la práctica realmente se utiliza la técnica de Nivelación Diferencial, la cual consiste en determinar el desnivel entre dos Bancos de Nivel si se conoce previamente la cota de uno de ellos.

### NIVELACIÓN



El equipo a utilizar son:

- Niveles geodésicos
- Miras geodésicas
- Tripiés
- Sapos
- Termómetro

## NIVELES GEODÉSICOS

Los niveles geodésicos modernos (basculantes y automáticos) tienen como características y ventajas principales ser ligeros, precisos, de fácil estacionamiento y observación. Ordinariamente son de color claro para reducir al mínimo los efectos térmicos de los rayos solares. El ajuste requerido en campo es mínimo; van equipados con un nivel esférico para poder nivelarlos. Su base triangular está provista de tres tornillos nivelantes, lo que asegura su nivelación. La retícula está grabada en una placa de vidrio. Se les puede acoplar (si no lo tienen integrado) un dispositivo de iluminación eléctrica para trabajos nocturnos.

### **Nivel Basculante.**

Lleva un tornillo basculante. Una vez nivelado el instrumento mediante su nivel esférico, se apunta el anteojo en la dirección deseada y se hace bascular ligeramente en el plano vertical de su eje por medio del tornillo basculante, hasta que quede centrada la burbuja del nivel tubular del anteojo. De este modo, la línea de mira queda horizontal.

Con propósitos de clasificación de los levantamientos geodésicos verticales, se establecen los siguientes órdenes y clases de exactitud, limitados a la nivelación diferencial y asociados con los valores de dicha exactitud que es posible obtener entre puntos ligados directamente, con un nivel de confianza del 95% y en tanto se observen las normas del caso; el indicador para cada orden y clase se da en función de la tolerancia para el error de cierre altimétrico de las nivelaciones desarrolladas en líneas o circuitos cerrados, con secciones corridas ida y vuelta.

### **Nivel Automático.**

Los instrumentos de esta clase mantienen horizontal su línea de mira por medio de un sistema pendular y de un sistema de prismas y espejos. El péndulo es amortiguado magnéticamente y su manejo resulta tan rápido como sencillo. En cada estación se nivela el nivel esférico y el péndulo mantiene horizontal la línea de mira.

Los nuevos niveles digitales permiten leer y registrar datos electrónicamente mediante el uso de miras geodésicas invar con código de barras. Poseen pantalla y teclado mediante los cuales es posible configurar el instrumento para que los datos obtenidos estén dentro del formato y las tolerancias requeridas. Presentan también la cualidad de realizar algunos de los ajustes que requieren los niveles de manejo automática. La transferencia de los datos minimiza errores en comparación con los niveles mecánicos.

### **Condiciones que debe cumplir un Nivel Geodésico.**

1. La directriz del nivel tubular debe ser perpendicular al eje vertical del instrumento.
2. El hilo horizontal de la retícula debe estar en un plano perpendicular al eje vertical cuando el instrumento está nivelado.
3. La línea de colimación debe ser paralela a la directriz del nivel cuando el instrumento está nivelado.

Los niveles automáticos y digitales deben cumplir la segunda condición.

### **Miras Geodésicas.**

Las miras para nivelación geodésica son de un cuerpo de madera o aluminio que contiene un fleje de metal invar graduado o con código de barras, que se sujeta a uno de sus extremos y por el otro es tensionado por un resorte. Los números de la graduación vienen pintados sobre la cara de la mira que se encuentra porcelanizada. Su cara posterior se puede colocar un termómetro para la toma de

temperaturas y un nivel circular para mantenerlas en posición vertical. En la parte inferior se les coloca una plataforma con un orificio, o un aro metálico para evitar desplazamientos al girarlas mientras están apoyadas en el sapo. Por último están provistas de asas de sujeción.

### **Trípode.**

En la nivelación geodésica, el trípode tiene como función soportar el nivel y para este fin está constituido por un armazón de tres patas rígidas de longitud fija, formadas por piezas de metal y madera perfectamente seca. Dichas patas están unidas en su parte superior a una cabeza metálica por medio de una articulación o charnela atornillada y en su parte inferior llevan un regatón metálico.

### **Sapo.**

Es parte del equipo y sirve de apoyo a las miras durante los trabajos de medición entre dos bancos de nivel consecutivos. Está formado por una placa metálica triangular, con un perno vertical en su centro que remata en un casquete esférico y tres patas con puntas de acero para fijarlo en el suelo.

### **Termómetro.**

Se usará para registrar la temperatura de la mira y deberá ser de mercurio, con una escala legible al décimo de grado centígrado, y capaz de medir las temperaturas extremas de la zona de trabajo.

Con propósitos de clasificación de los levantamientos geodésicos verticales, se establecen los siguientes órdenes y clases de exactitud, limitados a la nivelación diferencial y asociados con los valores de dicha exactitud que es posible obtener entre puntos ligados directamente, con un nivel de confianza del 95% y en tanto se observen las normas del caso; el indicador para cada orden y clase se da en función de la tolerancia para el error de cierre altimétrico de las nivelaciones desarrolladas en líneas o circuitos cerrados, con secciones corridas ida y vuelta.

| Orden de la Nivelación | Tolerancia para cierre de secciones corridas en ambos sentidos en (MM) |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Primero clase I        | $3 \sqrt{k}$                                                           |
| Primero Clase II       | $4 \sqrt{k}$                                                           |
| Segundo Clase I        | $6 \sqrt{k}$                                                           |
| Segundo Clase II       | $8 \sqrt{k}$                                                           |
| Tercero                | $12 \sqrt{k}$                                                          |

En estas expresiones, K es la distancia de desarrollo de la nivelación en un solo sentido, entre puntos de elevación conocida, expresada en kilómetros.

### **Primer orden, clase I y II.**

Los levantamientos geodésicos verticales que se hagan dentro de este orden deberán destinarse al establecimiento de la red geodésica vertical primaria o fundamental del país y en áreas

metropolitanas, a proyectos de ingeniería extensivos e importantes, a la investigación regional de movimientos de la corteza terrestre y a la determinación de valores geopotenciales.

**Segundo orden, clase I.**

Deberá tener aplicación en el establecimiento de la red geodésica vertical secundaria a modo de densificación, inclusive en áreas metropolitanas, para el desarrollo de grandes proyectos de ingeniería, en investigaciones de subsidencia del suelo y de movimientos de la corteza terrestre, y para apoyo de levantamientos de menor orden.

**Segundo orden, clase II.**

Deberá aplicarse a la densificación de las redes primaria y secundaria y ajustarse junto con ellas, para apoyo de proyectos locales de ingeniería, en cartografía topográfica, como apoyo de levantamientos locales y en estudios de asentamientos rápidos del suelo.

**Tercer orden.**

Se deberá aplicar al apoyo de levantamientos locales, subdivisión de circuitos de mayor orden de exactitud, proyectos de ingeniería pequeños, cartografía topográfica de escalas pequeñas, estudios de drenaje y establecimiento de pendientes en áreas montañosas.

Las líneas que conformen la red geodésica vertical deberán proyectarse en todos los casos como circuitos cerrados o de modo que principien y determinen en bancos de nivel pertenecientes a nivelaciones de orden de exactitud igual o mayor que el de la nivelación objeto del levantamiento.

El espaciamiento entre líneas de primer orden deberá estar comprendido entre 100 y 300 Km. Para clase I, y entre 50 y 100 Km., para clase II. Para el caso de nivelaciones de este orden en áreas metropolitanas, la separación entre líneas será de 2 a 8 Km. y de acuerdo con las necesidades en nivelaciones de propósitos específicos.

Para nivelaciones de segundo orden, clase I, la separación entre líneas deberá estar comprendida entre 20 y 50 Km., ser de 0.5 a 1.0 Km. en áreas urbanas, y de acuerdo con las necesidades para nivelaciones de propósitos específicos.

La distancia entre líneas de nivelación de segundo orden, clase II, deberá estar comprendida entre 10 y 25 Km. y según las necesidades en el caso de nivelaciones de finalidad particular.

En el caso de nivelaciones de tercer orden, el espaciamiento entre líneas se definirá de acuerdo con el propósito y necesidades de proyecto.

Las Líneas de nivelación estarán representadas físicamente por una serie de bancos de nivel establecidos a lo largo de vías de comunicación, en sitios en que el riesgo de pérdida o destrucción sean mínimos, con un espaciamiento variable entre uno y tres kilómetros y procurando, en el caso de primero y segundo orden, clase I, que el promedio sea de 1.5 Km. y que el espaciamiento no sea mayor que 2 kilómetros.

De acuerdo con el punto anterior, la longitud promedio de las secciones no deberá ser mayor que 2 kilómetros en el caso de nivelaciones de primero y segundo orden, clase I y de 3 kilómetros para nivelaciones de tercer orden cuando se corran en un solo sentido. Si estas últimas se corren en ambos sentidos, ida y vuelta, se deberá reducir el espaciamiento entre bancos para que la longitud de la sección sea de 3 kilómetros en promedio.

### **8.2.3. – RED GEODÉSICA GRAVIMÉTRICA.**

Los levantamientos geodésicos gravimétricos, son aquellos que comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en o cerca de la superficie terrestre, con el propósito fundamental de determinar el campo gravimétrico existente y su relación e influencia con los levantamientos geodésicos horizontales y verticales.

El Sistema Geodésico Gravimétrico de México, se encuentra materializado por el conjunto de puntos sobre el terreno que consti tuyen la Red Geodésica Gravimétrica, representada por mojones, monumentos, o partes d e estructuras sólidas con una placa metálica emp otrada, que identifica su ubicación y se encuentran distribuidos a lo largo o del territorio nacional. La densificación de la Red Geodésica Gravimétrica deberá continuar materializándose conforme lo indicado.

Todo punto pertenecient e a un leva ntamiento gravimétrico de propósito g eodésico, deberá estar referido a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad de 1971 (IGSN71) de la cua l México forma parte. E n caso de que s e requiera determinar anomalías gravimétricas, éstas se deberán generar en función de los sig uientes modelos matemáticos, en los cuales, se h an considerado los parámetros y constantes geométricas y físicas derivadas del GRS80 (Moritz, 1980), conforme a las siguientes fórmulas y tablas:

Desde que Newton descubrió que todos los objetos del Universo se atraen, se comenzó a investigar el efecto de la gravedad en la supe rficie terrestre, el oc éano, la atmósfera, los agujeros negros y muchos más.

La tendencia de los investigadores en la materia fue la de determinar con la mejor precisión el valor de la gravedad " $g$ " que se tomó como medio para confirmar el achatamiento de la tierra. Se sabe que la variación del valor de " $g$ " permitió concluir q ue nuestro planeta *no es esférico*, sino un cue rpo irregular de forma parecida a un elipsoide, cuyo eje menor está alineado al de rotación de la Tierra y el mayor al del plano ecuatorial, de donde resulta que el valor de " $g$ " es máximo en los polos y mínimo en el ecuador; de aquí también la variación del peso de los cuerpos, de acuerdo a su posición sobre la Tierra.

La técnica que nos permite conocer la diferencia de gravedad que existe en distintos puntos sobre la superficie terrestre es la *Gravimetría*. Actualmente la Red Geodésica Gravimétrica cuenta con un inventario de 24398 estaciones con valores de gravedad.

El conocimiento del valor de la gravedad es aplicable:

***En la Geodesia***

- Las separaciones entre el g eoide y el eli psoide (altura geoidal) que hacen posible la reducción de distancias al elipsoide.
- Las pendientes del geoide (desviación de la vertical)
- El refinamiento del geoide a partir de anomalías de g ravedad, o bien combinando datos gravimétricos con observaciones realizadas a través de instrumentos del GPS.
- Las alturas ortométricas precisas.

***En la Exploración Minera***

- Búsqueda de minerales pesados (de acuerdo a la distribución y dimensión de las ro cas de diferentes densidades).

***En la Geofísica y exploración petrolera***

- Levantamiento de estructuras geológicas de importancia regional, tales como fallas o lineamientos, que son prometedores para acumulaciones de minerales y mineralizaciones.
- En la investigación de la densidad de los materiales que componen la Tierra y la magnitud y posición de las riquezas minerales y vegetales del subsuelo.
- Exploración inicial de áreas cubiertas por una capa uniforme, que esconde los afloramientos y la estructura del subsuelo. La cubierta puede componerse de ve getación densa, de a gua somera o de aluviones.

- Identificación clara de estructuras y formaciones geológicas (domos de sal o de rocas ígneas) al combinar datos gravimétricos con los resultados de la exploración sísmica.
- Delinear la interfase o el límite entre las rocas sedimentarias y las rocas del basamento subyacentes.
- Observaciones con fines de prospección de depósitos minerales, petroleros, de gas y otros.

Para medir la gravedad, se utilizan gravímetros geodésicos con sensibilidad de 0.01 mgals de precisión.

*Los objetivos que se persiguen son:*

1. Establecer una Red confiable de bases gravimétricas ligadas a la International Gravity Standardization Net 1971, (IGSN 71), la cual provee los valores absolutos a nivel mundial.
2. Establecer las redes gravimétricas de 2° y 3° orden, conocidos como levantamientos regionales, que deberán ligarse a la red básica.
3. Establecer un banco de datos gravimétricos.
4. Elaborar cartas gravimétricas.
5. Desarrollar el geoide para el país.

## CONCLUSIONES.

El impacto de la Geodesia se observa en campos del conocimiento y la tecnología, con efectos directos en el terreno económico-social. Posibilita una mayor y mejor información sobre el territorio, lo cual permite mejorar diversos aspectos de la producción de cartografía, la actualización catastral, el manejo de aguas superficiales y subterráneas, la producción agropecuaria, el desarrollo de infraestructura (camino, represas, etc.) entre otros.

En los trabajos que requieren posicionamiento planimétrico de puntos de la superficie terrestre, la tecnología GPS ha logrado imponerse mundialmente por la alta precisión en los resultados obtenidos y la rapidez y bajo costo de operación. La determinación de Geoides locales y regionales es entonces fundamental en todos aquellos casos que se aplique GPS para la determinación de las alturas sobre el nivel medio del mar (NMM).

Las mediciones geodésicas dependen de la exactitud y precisión de los métodos matemáticos que ella utiliza. Por consiguiente, el estudio de la teoría y sus aplicaciones prácticas, que son el objetivo de este trabajo de tesis, constituyen una parte importante de los estudios relacionados con la geodesia.

Durante los últimos diez años la geodesia ha avanzado de forma considerable, incorporando el progreso de los resultados obtenidos de mediciones actuales de la Tierra. Estos resultados nos llevan a desarrollar nuevos modelos matemáticos de la figura terrestre, los cuales se asemejan de mejor manera a la forma real de nuestro planeta. Estos resultados posibilitan hoy en día generar modelos globales de referencia terrestre, los cuales posibilitan obtener una alta precisión en la determinación de parámetros en cualquier parte del planeta

El sistema de posicionamiento global mediante satélites (GPS: Global Positioning System) supone uno de los más importantes avances tecnológicos de las últimas décadas. Diseñado inicialmente como herramienta militar para la estimación precisa de posición, velocidad y tiempo, se ha utilizado también en múltiples aplicaciones civiles.

Las aplicaciones civiles siguen proliferando a un ritmo exponencial gracias a la incorporación de las técnicas diferenciales (DGPS) que ofrecen precisiones milimétricas.

Como ingenieros civiles es importante el conocer estas técnicas que representan un gran avance tecnológico de nuestros días y que en el presente inmediato nos servirán para diversas aplicaciones en nuestro quehacer profesional.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- ***Geodesia, Teoría y Práctica***, Pedro Garafulic Caviades, Universidad de Santiago de Chile
- 2.- ***Engineering and Design NAVSTAR GPS Surveying***, Department of the Army US Corps of Engineers
- 3.- ***Nociones de Geodesia***, Jorge Franco Rey
- 4.- ***Introducción al Sistema GPS***, Leica Geo Systems
- 5.- ***Sistemas Geodésicos***, Comité Nacional Argentino de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional
- 6.- ***Norma Técnica NT G001\_2005 Sistema Geodésico Nacional***, Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México.
- 7.- ***La Georreferenciación en Cartografía***, Rubén Carlos Ramos
- 8.- ***Ciencias de la medida de la Tierra***, Sagrario López Amador. Publicado por Revista Internacional de Ciencias de la Tierra.
- 9.- ***Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Descripción, Análisis de errores, aplicaciones y futuro***  
A. Pozo-Ruz\*, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, L. García, D. Guinea,\* F. Sandoval  
Instituto de Automática Industrial Consejo Superior de Investigaciones Científicas 28500 Arganda. Madrid,  
\*Dpto. de Tecnología Electrónica E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación. Universidad de Málaga
- 10.- ***Modelo Geoidal en México y sus aplicaciones***, LMA. David Ávalos Naranjo, Ing. Raúl Muñoz Abundes, Ing. Manuel Sosa Gaytán, Publicaciones INEGI
- 11.- ***Base de Datos Geodésicos del INEGI***, Revista de Información y análisis.
- 12.- ***Generalidades sobre el sistema GPS***, Kollner Labraña & Cia , Servicio Técnico Sokkia
- 13.- ***User & Space Segment***, The US Coast Guard: Civil GPS Interface Committe (1997)