



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO DE EDUCACIÓN EN
LÍNEA
(CIDEL)**

**CURSO
GEODESIA**

CV131

DEL 26 AL 30 DE SEPTIEMBRE DEL 2005

**Instructores:
Ing. Germán García González**

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

I N D I C E

ANTECEDENTES

1.- GEODESIA POR SATELITES.

- 1.1.- Definición de Geodesia Satelital.
- 1.2.- Clasificación y Conceptos Básicos de la Geodesia.

2.- ELEMENTOS FISICOS Y MATEMÁTICOS DE LA GEODESIA SATELITAL.

- 2.1.- Sistemas de Coordenadas de Referencia.
- 2.2.- Sistemas de Tiempo.
- 2.3.- Propagación de la Señal.

3.- INTRODUCCION AL SISTEMA GPS.

- 3.1.- Introducción.
- 3.2.- Las Observables.
- 3.3.- Calidad y bondad de las observaciones.
- 3.4.- Métodos de Posicionamiento.

transformación.

2. Uso de técnicas para obtener directamente las coordenadas tridimensionales. Tradicionalmente las redes geodésicas de cualquier tipo han estado limitadas a la superficie emergida de la Tierra, tanto por falta de tecnología como por falta de motivación.

Actualmente la tecnología permite incluir los fondos marinos que por otra parte es necesario conocer para navegación hidrografía etc.

Esta forma de representar la tierra mediante una colección de puntos, es una forma discreta, para algunos propósitos es necesario considerar la figura de la tierra expresada a través de una fórmula matemática, es decir una representación continua de la superficie de la Tierra. Dada su complejidad es necesario el uso de largas series de funciones que nos permitan aproximarnos poco a poco a la forma real, esto nos llevará hacia los modelos de Tierra y campo de gravedad.

EL GEOIDE COMO FIGURA DE LA TIERRA.

Se denomina **GEOIDE** a un cuerpo geométrico limitado. La superficie del geoide en todos sus puntos está ligada fuertemente con la dirección de la fuerza de gravedad.

El geoide es una superficie definida físicamente, como una superficie equipotencial que sirve para representar la figura de la Tierra. Podemos imaginarlo si la Tierra estuviera toda cubierta de agua, teóricamente la superficie de ese mar podría tener potencial constante, puesto que el agua puede fluir si hubiera diferencia de alturas. En realidad tampoco sería así debido a la variación de la temperatura marina, la salinidad y las corrientes. El geoide describe así la superficie de una Tierra cubierta de agua. Por supuesto la superficie del mar es menos estable que la de la tierra, y está influenciada por fenómenos de mareas; debe considerarse el geoide como la superficie del nivel medio del mar. De la observación del mar se puede deducir que aunque puede variar a lo largo del día del orden de metros, la media mensual lo hace sólo del orden de dm. y la media anual tiene solo una variación de 10 cm. El nivel medio del mar se define entonces como la media de la superficie del mar durante un largo periodo de tiempo. Las estaciones costeras con mareógrafos contribuyen a hacer esta determinación. El centro del geoide coincide con el centro de masas de la Tierra.

De forma similar a lo dicho para la figura real de la Tierra, el Geoide puede obtenerse con una serie discreta de puntos, donde se ha calculado el potencial, o de forma continua en términos de una fórmula matemática. Dada su complejidad sólo una serie de funciones infinita pueden describirlo exactamente.

Sin embargo la figura del geoide relativa a un elipsoide de referencia puede determinarse bastante exactamente (1,2 m) en regiones donde se tienen bastantes medidas como es Europa, Norte América, o Australia.

El geoide es la superficie de referencia para las redes altimétricas. Para las redes horizontales la superficie de referencia debe ser menos compleja que el Geoide, por eso no se usa, aunque existe una versión simplificada del geoide, que consiste en tomar sólo los primeros términos de la fórmula matemática infinita que lo describe. De esta forma se obtienen superficies más simples denominadas esferoides, pero siguen siendo más complejas que el elipsoide.

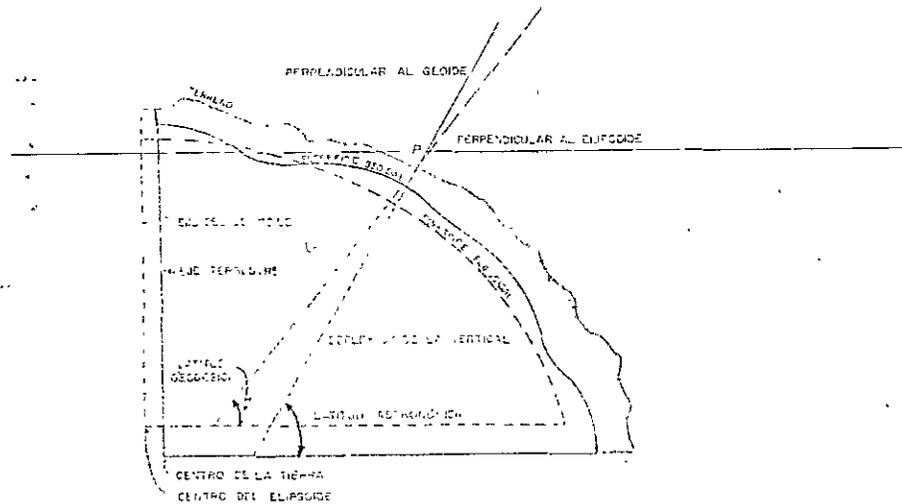
Las mediciones geodésicas se ejecutan sobre una complicada superficie física de la Tierra

Coordenadas de los puntos de la red geodésica, las cuales son referidas a cierta superficie de la tierra determinada matemáticamente (superficie del elipsoide terrestre).

Altura de los puntos referidos a una superficie inicial (cerca de la superficie de los mares y océanos).

La longitud y azimut de las líneas geodésicas entre puntos de la superficie terrestre, los cuales se encuentran en lugares diferentes y mucho muy lejanos unos de otros.

En función de esto, se presenta la necesidad de dar solución al problema del traslado de las mediciones realizadas directamente en la superficie física de la tierra hacia sus coordenadas geodésicas, y la determinación de las alturas de estos puntos, los cuales son calculados en un sistema determinado y sobre una **superficie de referencia** la cual es el resultado de cálculos matemáticos generalizados. El geode es una superficie a lo largo de que el potencial de gravedad está por todas partes igual y a que la dirección de gravedad siempre es perpendicular. El ángulo entre la línea de plomo que es perpendicular al geode (a veces llamó "el vertical") y el perpendicular al elipsoide (a veces llamó "el normal") está definido como la desviación del vertical. La componente norte-sur de la desviación del vertical



es comprensible que para la geodesia y cartografía, tenga gran importancia el concepto del geode en su aspecto geométrico general e íntegro.

Otra superficie próxima al geode y matemáticamente más simple la constituye un elipsoide de tres ejes, tal que el eje menor coincida con el eje de rotación, y los otros ejes en el plano ecuatorial. Usualmente se define con los 4 parámetros siguientes:

- a) Longitud del semieje mayor a
- b) Aplanamiento polar $f = (a-b)/a$
- c) Aplanamiento ecuatorial $f_e = (a-c)/a$
- d) Longitud geográfica del semieje mayor a .

Este elipsoide respecto del elipsoide de dos ejes, dos ejes ecuatoriales iguales, no difiere mucho

pues el aplamamiento ecuatorial es muy pequeño.

EL ELIPSOIDE DE REVOLUCIÓN COMO FIGURA DE LA TIERRA.

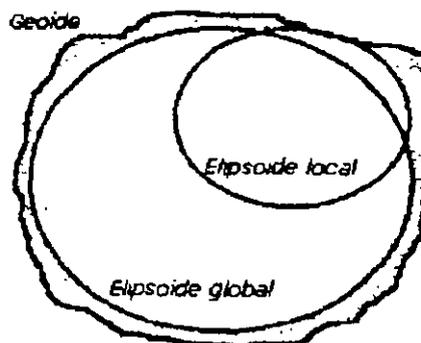
Puesto que los cálculos sobre un elipsoide de tres ejes son más complicados que sobre uno de dos, en la práctica se recurre a esta figura para representar a la tierra. Se considera un elipsoide de revolución entorno al eje de rotación terrestre, de tal forma que las secciones meridianas son elipses y la secciones paralelas circunferencias El problema de encontrar el elipsoide que mejor se ajuste al geode es el problema geodésico clásico, para determinar sus dos parámetros, semieje mayor y aplamamiento (a, f) se han usado distintas técnicas a lo largo de la Historia, en la actualidad el aplamamiento se determina con mucha más exactitud través de las perturbaciones producidas en la órbita de los satélites artificiales que por cualquier método terrestre basado en redes de triangulación. En cuanto al semieje mayor se determina a partir de la medida de distancias en la superficie de la tierra.

Algunos de los elipsoides que aproximan toda la Tierra son los siguientes:

NOMBRE	a Km.	f'	observación
HAYFORD 1924	6378.388	297	Terrestre
IAG 1971	6378.160	298.247	astonomica
WGS84 1984	6378.137	298.257	satélite

Hasta ahora se ha tratado con elipsoides cuyo propósito es que se aproximen lo más posible a la figura de la Tierra, y se ha forzado a que sus ejes fueran coincidentes con los ejes de inercia de la Tierra, por eso se han llamado *elipsoides geocéntricos* pero existen otra familia de elipsoides cuyo propósito no es representar la forma y tamaño dela Tierra sino que sirvan como referencia para datums geodésicos horizontales respecto a los cuales dar coordenadas geodésicas.

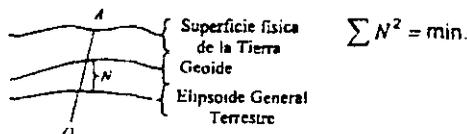
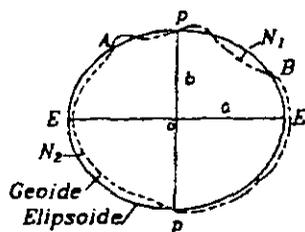
Estos elipsoides de referencia se eligen de forma que aproximen al geode sólo localmente (un continente, un país etc.) y no necesitan ser geocéntricos, pero en esa zona se aproximan mas al geode que un elipsoide geocéntrico, gráficamente seria como se muestra en la figura.



El elipsoide general terrestre se determina como un elipsoide, el cual representa de la mejor manera al geode en una forma integra. La determinación de las dimensiones del elipsoide general terrestre y la orientación de éste en el cuerpo de la tierra deben realizarse bajo las siguientes condiciones:

- ❖ Coincidencia del centro del elipsoide con el centro de gravedad de la tierra, y coincidencia del plano del ecuador del elipsoide con el plano del ecuador terrestre.

- ❖ Igualdad de los volúmenes del elipsoide y geode.
- ❖ La suma de los cuadrados de la desviación en relación con la altura N de la superficie del geode con respecto del elipsoide debe ser mínima.

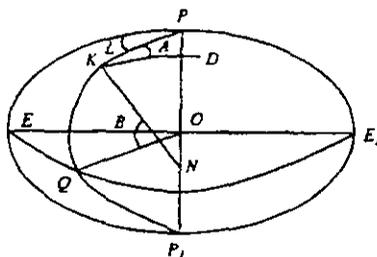


Esta condición establece completamente la cercanía geométrica de la superficie del geode a la del elipsoide terrestre.

Al elipsoide de dimensiones determinadas y poseedor de una orientación, en el cual sobre su superficie se traslada los resultados de los trabajos geodésicos y cartográficos de un país o grupo de países, se le denomina elipsoide de referencia.

El elipsoide de referencia debe coincidir lo más posible con el geode. Por eso en algunas ocasiones cuando el elipsoide, que más se asemeja al geode de un país se le denomina elipsoide terrestre.

La posición de los puntos de la superficie terrestre sobre la superficie del elipsoide de referencia en la geodesia y en la cartografía se determinan generalmente por las latitudes, longitudes y azimuts geodésicos.



se denomina latitud (ϕ) del punto K al ángulo agudo B, formando por la normal KN a la superficie del elipsoide de referencia en el punto K y el plano del ecuador EQE1.

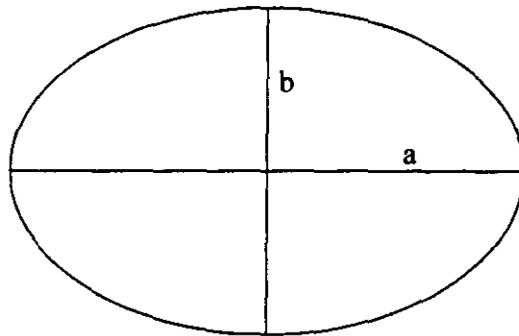
Se denomina longitud geodésica (λ) del punto K al ángulo diedro E0Q, formado por el plano del meridiano origen Greenwich y el plano del meridiano del punto K.

Se denomina azimut geodésico (α) de la línea que va del punto K a cualquier otro punto D, al ángulo formado por el plano del meridiano geodésico del punto K (PKQP1) con la normal del plano DKN construido en el punto K y obviamente contiene a la normal KN y al punto D.

Se ligan entre sí en un punto dado por medio de la normal al elipsoide de referencia y por medio de los planos normales a este elipsoide.

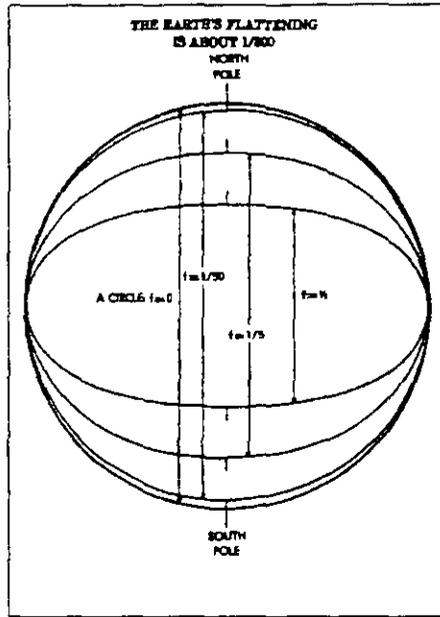
Evidentemente, que las coordenadas geodésicas se diferencian de las astronómicas como consecuencia de las desviaciones de la superficie del geoide con respecto a la superficie del elipsoide.

Desde que la tierra está de hecho ligeramente chata en los polos y se pandea un poco al ecuador, la figura geométrica usada en la geodesia para aproximar el más casi la forma de la tierra es un elipsoide de revolución. El elipsoide de revolución es la figura que se obtendría girando una elipse sobre su eje más corto.



Un elipsoide de revolución está singularmente definido especificando dos dimensiones.

a = semieje mayor
b = semieje menor



Los elipsoides listados debajo han tenido la utilidad en el trabajo geodésico y muchos todavía están en el uso. Los elipsoides más viejos se nombran para el individuo que derivó los y el año de desarrollo se da. El elipsoide internacional se desarrolló por Hayford en 1910 y adoptó por la Unión Internacional de Geospatial Ciencias División (IUGG) que lo recomendó para el uso internacional.

<u>NOMBRE</u>	<u>RADIO ECUATORIAL</u>	<u>ACHATAMIENTO</u>	<u>LUGAR DE USO</u>
Krassowsky (1940)	6,378,245m	1/298.3	La Rusia
Internacional (1924)	6,378,388	1/297	Europa
Clarke (1880)	6,378,249	1/293.46	Francia, Africa,
Clarke (1866)	6,378,206	1/294.98	América del Norte
Bessel (1841)	6,377,397	1/299.15	Japón
Airoso (1830)	6,377,563	1/299.32	El Gran Bretaña
Everest (1830)	6,377,276	1/300.80	India
WGS 66 (1966)	6,378,145	1/298.25	USA
GRS 67 (1967)	6,378,160	1/298.25	Australia, Sud América
WGS 72 (1972)	6,378,135	1/298.26	USA
GRS 80 (1979)	6,378,137	1/298.26	Mundial

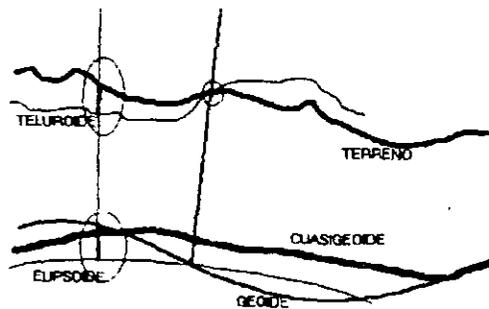
Los desarrollos tecnológicos modernos han creado los nuevos y rápidos métodos para la colección de datos y desde el lanzamiento de los primeros sputnik rusos, el datos orbital se ha usado para investigar la teoría de elipticidad.

OTRAS FIGURAS MATEMÁTICAS COMO FIGURA DE LA TIERRA.

La Geodesia moderna utiliza 2 superficies adicionales mas para representar la figura de la Tierra:

TELUROIDE: figura diseñada para aproximar al superficie física de la Tierra y se define como aquella superficie cuya altura sobre un elipsoide geocéntrico de referencia es la misma que la altura del terreno sobre el geoide. (Hirnoven 1960)

CUASIGEOIDE: Introducido por Molodenski en 1960, como la solución matemática al geoide. Cuando se calcula el Geoide a través de las alturas sobre el elipsoide, estas alturas se denominan ondulación del Geoide (N), se debe asumir alguna distribución de masas dentro de la Tierra, y esto solo puede modelarse pues no es conocido. El cuasigeoide es la solución obtenida sin ninguna suposición. En este caso la solución encontrada no es N , ondulación del geoide, sino ζ , y se denomina *anomalía de la altitud*. la diferencia entre ambas es que N nunca puede calcularse exactamente y ζ ; es un resultado exacto. El cuasigeoide tiene significado fisico y no es una superficie equipotencial, pero es válido como superficie de referencia para las alturas, de hecho es mas ventajosa que el geoide, dada la dificultad de calcular éste. Por otra parte el cuasigeoide y el geoide coinciden en la superficie del mar donde $N=\zeta$; en general $N-\zeta$; es de pocos metros, pero depende de la superficie del terreno y será mayor en zonas montañosas.

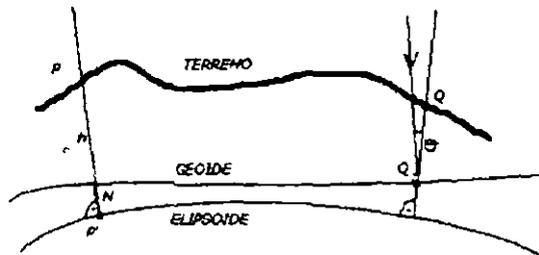


En resumen la diferencia entre todas estas superficies se puede expresar como:

DIFERENCIA		máximo en metros
TERRENO	GEOIDE	10^4
GEOIDE	CUASIGEOIDE	1
GEOIDE	ELIPSOIDE	10^2
TELUROIDE	TERRENO	10^2
ELIPSOIDE 2 EJES	ELIPSOIDE 3 EJES	10^2
ELIPSOIDE	ESFERA	10^4

RELACION GEOIDE y ELIPSOIDE.

La relación entre el elipsoide y el geoide se ilustra en la figura siguiente. La separación a lo largo de la vertical al elipsoide entre el geoide y un elipsoide particular se denomina *ondulación del Geoide* (N). El valor de esta ondulación depende del elipsoide considerado, y para un elipsoide general que aproxime toda la tierra puede llegar a ser de 100 m. La relación geométrica entre la ondulación del Geoide, la altura elipsoidal y la altura ortométrica, es aproximadamente $N+H=h$. El ángulo entre la dirección normal al elipsoide y la dirección de la línea de la plomada, se denomina *desviación de la vertical* (θ), cuando se define un elipsoide para aproximar al figura de la Tierra, este se elige de forma que las desviaciones de la vertical sean mínimas, y así se consigue que el elipsoide se ajuste lo mas posible, si elipsoide y Geoide son tangentes en algún punto en ese punto las desviaciones serán nulas y la ondulación también.



APLICACIONES DE LA GEODESIA

Clásicamente, la Geodesia, sus técnicas y medidas han sido la herramienta para situar los lugares de la Tierra unos con respecto a otros, lo que hoy día llamamos *posicionamiento relativo*. Las redes de puntos así formadas, conocidas como *redes de Triangulación* eran la base para la construcción de mapas. Hoy día las aplicaciones son mucho más variadas:

1. Levantamiento cartográfico de territorios, es decir, representación de la superficie terrestre sobre un plano, tanto las grandes superficies como las pequeñas, rurales o urbanas, necesitan de puntos de control, apropiadamente distribuidos, donde se conozca la posición horizontal y vertical.
2. En los proyectos de Ingeniería en la construcción de grandes edificios, puentes, etc necesitan de sistemas coordenadas de un tipo u otro, y tener acceso a puntos de control. También es necesario a menudo, conocer los movimientos del terreno antes y durante y después de la construcción. Para la construcción de embalses y túneles, el conocimiento de las superficies equipotenciales del campo de gravedad también son necesarias.
3. Demarcación de fronteras, provinciales o estatales, resulta económicamente más rentable si se pueden referir a redes geodésicas de coordenadas conocidas.
4. En Ecología, recientemente comienza a estudiarse el impacto que las acciones humanas tienen en el medio ambiente, uno de estos efectos es el movimiento de tierra causado por la instalación o mantenimiento de instalaciones subterráneas, o depósitos de residuos.
5. El establecimiento de bancos de datos, de utilidad en transportes, usos del suelo, estadísticas poblacionales, basados en localización de zonas delimitadas por coordenadas, también necesitan de las redes geodésicas.
6. En geografía toda la información relativa a posición debe proporcionarla la geodesia, dado su carácter global, aunque a nivel de exactitud requerido no sea alto.
7. Determinación de la forma y campo de gravedad de otros planetas, aunque se conoce

como *Plan etología* no es otra cosa que Geodesia.

Es necesario uniformar los levantamientos geodésicos sean éstos, horizontales, verticales o gravimétricos, con el objeto de incrementar y mantener la red geodésica nacional, y que asimismo sirvan de apoyo a los trabajos cartográficos.

Para que un levantamiento sea considerado como geodésico deberán tomar en cuenta los efectos de curvatura terrestre y ejecutarse con instrumental y procedimientos que permitan una precisión interna.

Levantamientos Geodésicos Horizontal:

son aquellos que comprenden una serie de medidas efectuadas en el campo, cuyo propósito final consiste en determinar las coordenadas geográficas horizontales de puntos situados sobre la superficie terrestre.

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 un cierto nivel de referencia.

Levantamientos Gravimétricos:

Aquellos que comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en la superficie terrestre, cuyo propósito consiste fundamentalmente en determinar el campo gravimétrico existente y su relación e influencia con los tipos de levantamientos geodésico horizontal y vertical.

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al Datum.

En lo que respecta a las alturas, todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido a un Datum o nivel de referencia vertical obtenido mediante la realización de una serie de observaciones mareográficas que cubran un período no menor de seis meses en forma continua.

Por lo que se refiere a la gravedad, todo punto perteneciente a un levantamiento gravimétrico de propósitos geodésicos deberá estar referido a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad de 1971.

Se define como Red Geodésica Nacional al conjunto de puntos situados sobre el terreno, dentro del ámbito del territorio nacional, establecidos físicamente mediante monumentos 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 geográficas así como el campo gravimétrico asociado, con relación a un sistema de referencia dado.

La determinación de las posiciones exactas de puntos en la superficie de la tierra. Cuatro técnicas de la topografía tradicionales.

- (1) el posicionamiento astronómico,
- (2) la triangulación,
- (3) el trilateración, y
- (4) el travesaño es usa en general para determinar las posiciones exactas de puntos en la superficie de la tierra.

En los recientes años, los desarrollos tecnológicos modernos han agregado varios nuevos métodos que utilizan los satélites de tierra artificiales. Otro campo de esfuerzo, fotogramétricos, ha contribuido a la topografía geodésica durante muchos años

El Posicionamiento horizontal

Se define como levantamientos geodésicos horizontal al conjunto de procedimientos y operaciones de campo y gabinete destinado a determinar las coordenadas geodésicas de puntos sobre el terreno convenientemente elegidos y demarcados, con referencia al Datum.

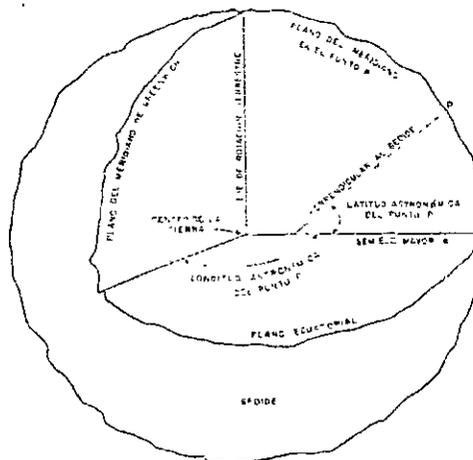
La Determinación de la Posición astronómica

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 propósito de control de las correspondientes coordenadas geodésicas obtenidas por otros métodos de levantamiento, para investigaciones relacionadas con el Datum local y su establecimiento para el control de la dirección de otros levantamientos y para la definición de las desviaciones de la vertical.

La posición de un punto puede obtenerse directamente observando las estrellas. El posicionamiento astronómico es el método del posicionamiento más viejo. Geodestas debe usar las posiciones astronómicas junto con otros tipos de datos del estudio como la triangulación y trilateración establecer las posiciones precisas.

Mientras los geodestas usan las técnicas detalladas y muy precisas por determinar la latitud astronómica, el método más simple, en el hemisferio norteño, es medir la elevación de Polaris sobre el horizonte del observador. La latitud astronómica está definida como el ángulo entre el perpendicular al geoide.

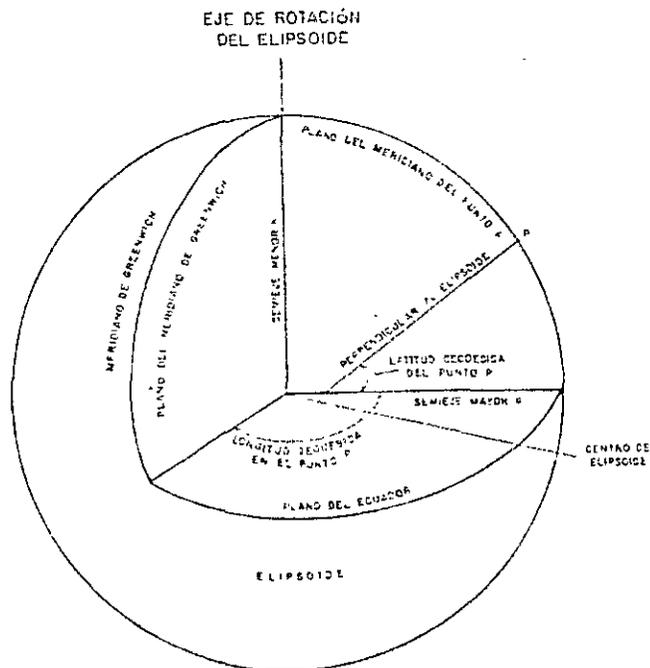


La triangulación

Constituye el método clásico y universalmente conocido para el desarrollo de los levantamientos geodésicos horizontales, mediante un procedimiento que determina las longitudes de los lados de un

sistema de triángulos interconectados, con base en la medida de algunos lados y de todos los ángulos.

Se entendera por triangulación el método de levantamiento geodésico horizontal consistente en un conjunto de figuras conformadas por triángulos interconectados y traslapados que forman una cadena o cubren un área específica, en donde se han medido algunos lados y los ángulos en los vértices, con el propósito ultimo de determinar las coordenadas de dichos vértices.



Trilateración

En este método la situación se invierte, para medir directamente los lados y de ahí derivar los valores angulares, excepto que para efectos de control de dirección se requiere la medida de algunos ángulos.

Se entenderá como trilateración al método de levantamiento geodésico horizontal consiste en un conjunto de figuras conformadas por triángulos interconectados en los que se miden las distancias y algunos ángulos formando una cadena o cubriendo un área específica con el propósito ultimo de determinar las coordenadas de los vértices de los triángulos.

Pologonación

Consiste en la medida directa de ángulos y distancias entre puntos consecutivos que forman una línea poligonal continua.

Se define como Pologonación al método de levantamientos geodésicos horizontal consiste en un conjunto de líneas conectadas por sus extremos en forma sucesiva, conformando una línea quebrada

en la que se miden todas las distancias y se observan todos los ángulos con el propósito último de determinar las coordenadas de los puntos que constituyen los extremos de cada línea. El método ofrece las ventajas de una mayor flexibilidad, cubrimiento relativamente rápido y economía, pero su rigidez relativa es menor que la de los levantamientos tratados anteriormente.

Los Sistemas observación

Se han usado dos sistemas básicos por obtener la información geodésica de la tierra artificial satélite-óptico y electrónico. Estos sistemas lo han hecho posible realizar las varias medidas geodésicas para relacionar las posiciones conocidas o desconocidas al centro de la tierra, relacionar las posiciones desconocidas a las redes de la triangulación existentes, y para relacionar las redes de la triangulación a nosotros. Los parámetros importantes del campo gravitatorio de la tierra y valores para la tierra están allanando también se ha obtenido.

Observación de Satélite Doppler

Este método de levantamiento se basa en la observación del efecto Doppler relacionado con la transmisión radial procedente de Satélites artificiales, para determinar la posición de puntos sobre la superficie terrestre.

Para efectos de definición, se entenderá que la observación de satélites Doppler está conectada con el método de posicionamiento tridimensional que hace uso del efecto Doppler asociado con la transmisión radial de una serie de Satélites Transit situados en órbita polar de modo que mediante el conocimiento de la posición instantánea en el espacio de dichos satélites, es posible determinar las coordenadas de puntos situados sobre la superficie terrestre, en los que se instalan los sistemas de recepción de señales.

Método inercial.

El método se fundamenta en la medida de variaciones de aceleración referidas a tres ejes que estabilizan mediante giroscopios, conjunto montado sobre una plataforma móvil. Las variaciones se traducen en desplazamientos que referidos a una cierta posición de origen, producen las coordenadas geodésicas requeridas. El método ofrece las ventajas de poder determinar además otros parámetros geodésicos, utilización en todo tiempo y ser de alto rendimiento pero habrá que considerar su costo inicial y capacidad real para producir resultados exactos. Debido a esto último y a que el método está todavía en la etapa introductoria, no se darán por ahora normas y especificaciones.

El Posicionamiento vertical

La topografía vertical es el proceso de determinar las altura-elevaciones sobre la superficie del nivel del mar. Esta clase de medidas se hará fundamentalmente en conexión con levantamientos geodésicos verticales y su propósito consiste en determinar la distancia vertical existente entre puntos del terreno y un cierto Datum o nivel de referencia que normalmente es el nivel medio del mar.

Se define como Nivel Medio del Mar (NMM) en un sitio dado al procedimiento aritmético de las alturas horarias de la marea, obtenido del registro de un graficador continuo. Diseñado para tal

propósito que ha operado durante un periodo que según las necesidades varia desde un minuto a seis meses, hasta el termino completo de Saros (19 años aprox.).

Se define como Levantamiento Geodésico Vertical al conjunto de procedimientos y operaciones de campo y gabinete destinados a determinar la elevación de puntos sobre el terreno convenientemente elegidos y demarcados, con referencia a un determinado NMM.

La nivelación geodésica precisa se usa para establecer una red básica de puntos de control verticale.

Hay tres técnica *nivelación diferencial , trigonométrica y barométrico.*

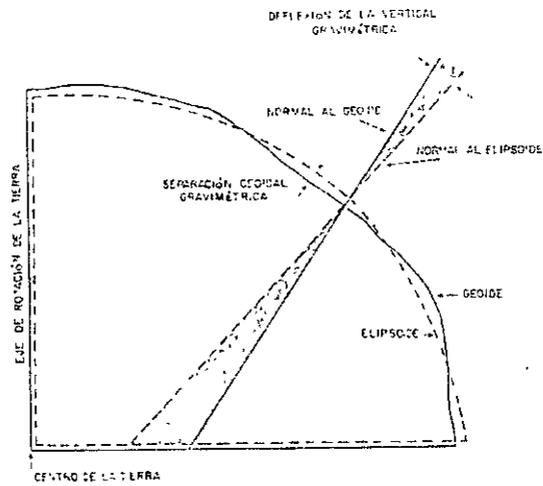
La **nivelación diferencial** constituye el método clásico utilizado para el desarrollo de los levantamientos geodésicos verticales, mediante un procedimiento que determina directamente la diferencia de alturas entre puntos vecinos, por la medida de la distancia vertical existente entre dichos puntos 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 diferencia 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.

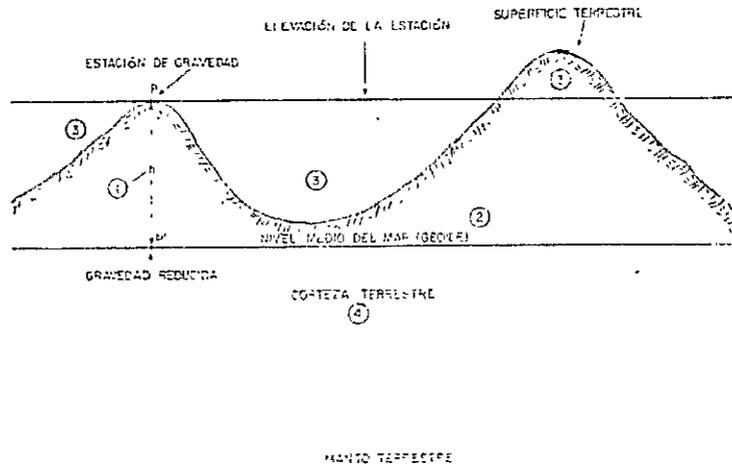
En la **nivelación barométrica**, las diferencias en la altura son determinadas midiendo la diferencia en la presión atmosférica a las varias elevaciones. La presión atmosférica es moderada por volátil o los barómetros aneroide, o un termómetro del punto de ebullición. Aunque el grado de precisión posible con este método no es tan grande como cualquiera del otro dos, es un método que obtiene las alturas relativas muy rápidamente a puntos que están separadamente bastante lejanos. Se usa ampliamente en el reconocimiento y los estudios exploratorios dónde se harán las medidas más exigentes más tarde o no se requerirán.

Levantamientos Gravimétricos.

Los levantamientos gravimétricos se harán con el propósito de estructurar la Red Gravimétrica Nacional, para efectos de conocimiento del campo de gravedad terrestre y proporcionar información de apoyo a los levantamientos horizontales y verticales en conexión con estudios de geodesia dinámica y de su relación con los parámetros de posición. Básicamente, deberá orientarse a la determinación de alturas ortométricas conocer los valores de la desviación de la vertical y de las alturas geoidales independientemente de otros usos geodésicos o geofísicos que se les pueda dar.



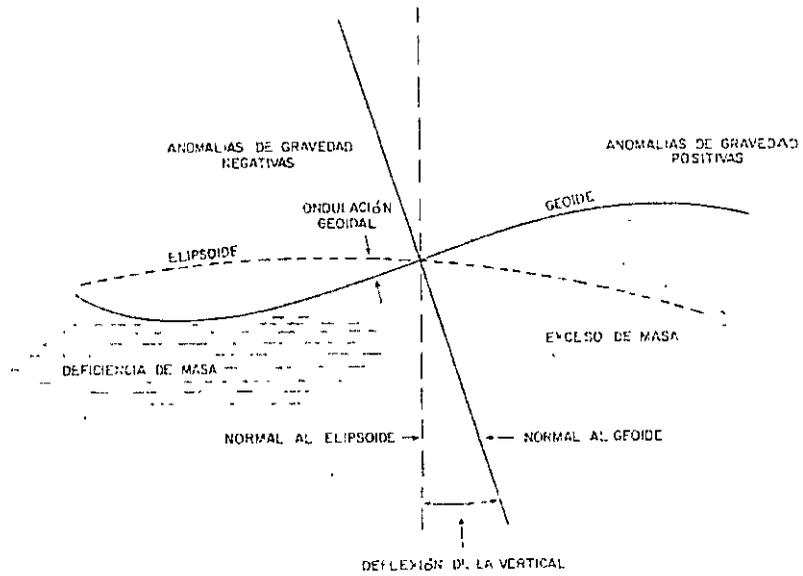
Los levantamientos gravimétricos pueden ser absolutos o relativos. Los primeros comprenden las medidas directas del valor de la gravedad en un punto dado mediante la utilización de péndulos u otros sistemas. En atención a que en geodesia es más práctica y precisa la determinación de diferencias de gravedad entre puntos y a que mediante ligas apropiadas se pueden conocer los valores absolutos (método relativo), las normas que en esta parte se indiquen referirán solamente a las medidas relativas de la gravedad.



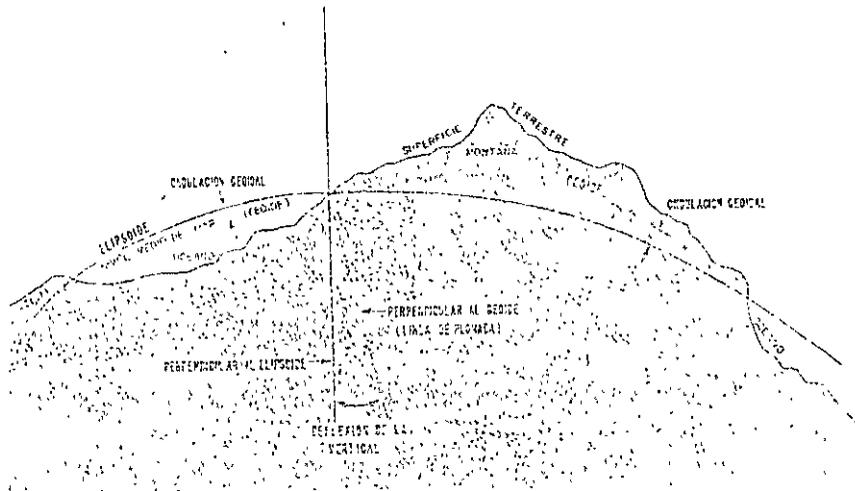
- 1- ELEVACIÓN, h , DEL PUNTO DE OBSERVACIÓN
- 2- MASA ENTRE LA ELEVACIÓN DE LA ESTACIÓN Y EL NIVEL DEL MAR
- 3- EFECTO DEL TERRENO
- 4- ESTRUCTURA GENERALIZADA DE LA CORTEZA TERRESTRE

todo levantamiento gravimetrico deberá estar referido a la red de control o sea La Red Gravimetrica Nacional estará integrada por:

1. la red básica de primer orden la cual comprende las estaciones fundamentales de la IGSN-71 las estaciones de base de referencia y auxiliares y las líneas de calibración.
2. Las estaciones de segundo orden pertenecientes a levantamientos regionales



(Crea por la distribución irregular de la masa en la corteza terrestre)



DESARROLLO EN LA GEODESIA

Hasta antes de la era espacial y obviamente precedentes a la aparición de la geodesia satelital, generalmente la RGN se trataban en un sistema de coordenadas esféricas y para fines prácticos en el sistema de coordenadas planas rectangulares UTM.

Sin embargo al utilizar los sistemas globales de posicionamiento (TRANSIT, TSICADA, GPS NAVSTAR y GLONASS), en la construcción de las RGN y de redes geodésicas sencillas, se intensificó la utilización de los sistemas de coordenadas geocéntricas rectangulares espaciales XYZ.

Para fines de obtener coordenadas esféricas a los sistemas de coordenadas espaciales se les refiere a un elipsoide donde el origen de ambos sistemas de coordenadas coincide.

Que las técnicas de medición contemporáneas se inscriben ahora en un entorno dinámico – espacial que permite resultados muy precisos en tiempos relativamente cortos en comparación con los métodos tradicionales, en particular el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que en la década de los noventa ha venido a revolucionar la tecnología de medición geodésica, sustituyendo ventajosamente a los métodos de posicionamiento astronómico, triangulación, poligonación y Doppler, aplicados hasta fechas recientes para conformar la Red Geodésica Nacional.

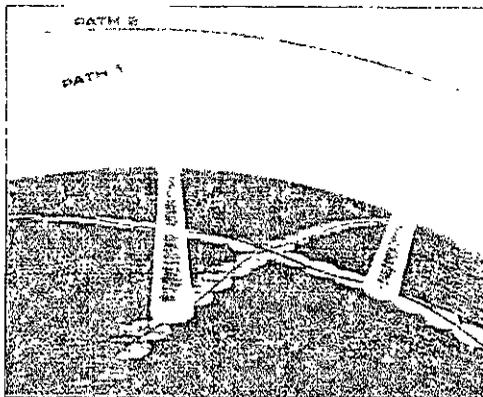


Figure 32
THE MEASUREMENT OF THE GEOID
BY THE SATELLITE ALTIMETER

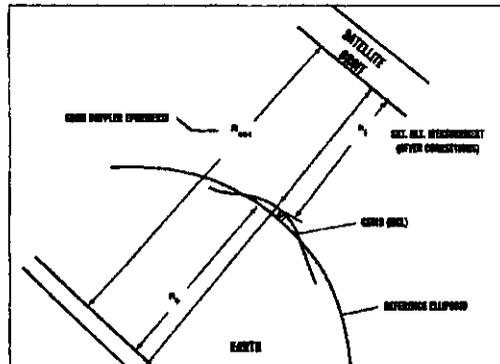


Figure 33

El Sistema Global de Posicionamiento.

El sistema consiste de tres segmentos, un conjunto de estaciones terrenas que rastrean y operan los satélites, una constelación de 24 satélites en órbita que en forma permanente emiten su efemérides en dos frecuencias correlacionadas y los receptores que se ubican en la posición que se quiere determinar (automóvil, punto geodésico, barco, etc.).

los modernos equipos de medición disponibles en la actualidad, tales como distanciómetros electromagnéticos y de posicionamiento vía satélite, han superado en por lo menos un orden de magnitud la precisión del Datum Norteamericano de 1927 o NAD27, definido en las Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos.

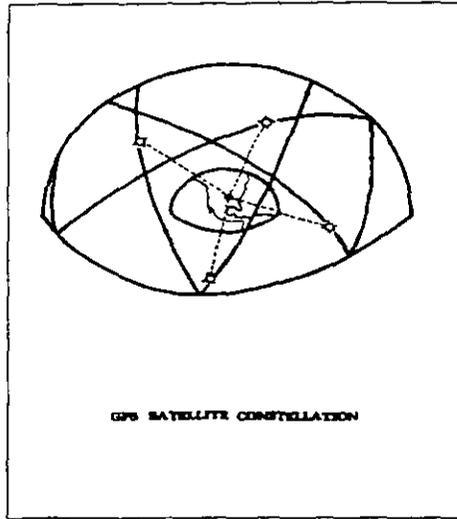
Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) para el año 1992 con datos de la época 1988 y que se denomina ITRF92 época 1988 que es el nuevo Sistema Geodésico de Referencia oficial para México.

Las coordenadas cartesianas ITRF92 se deben transformar a coordenadas geodésicas curvilíneas (latitud, longitud y altura elipsoidal) en el elipsoide del Sistema Geodésico de Referencia 1980 (GRS80) que es definido por los siguientes parámetros:

Semieje Mayor	a	6 378 137 m
Velocidad Angular	ω	7 292 115x10 ⁻¹¹ rad/seg
Constante Gravitacional Geocéntrica	GM	3 986 005x10 ⁸ m ³ /seg ²
Factor dinámico de la Tierra	J2	108 263x10 ⁻⁸
Constantes geométricas derivadas		
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 46
Achatamiento	f	0.003 352 810 681 18
Recíproco del achatamiento	f-1	298 257 222 101
Cuadrante meridiano	Q	10 001 955.729 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

Sistema Inercial de Coordenadas.

El sistema de coordenadas de Greenwich (ITRF92) esta construido en base a un sistema de coordenadas inercial. (inmóvil), el cual lo podemos definir de la siguiente manera: supongamos que el origen 0 del sistema de coordenadas coinciden con el centro de masas de la Tierra el eje Oxo se dirige al punto promedio del equinoccio vernal Y_0 de cierta época T_0 y, que a su vez, se encuentra sobre el plano ecuatorial de la Tierra, el eje Ozo coincide con el eje medio de rotación de la Tierra y con dirección al norte y el eje Oyo completo un sistema de orientación derecha positiva dirigido al oriente mediante un triedro ortogonal. En geodesia es necesario realizar el traslado del sistema inercial al sistema de coordenadas geocéntrico de Greenwich.

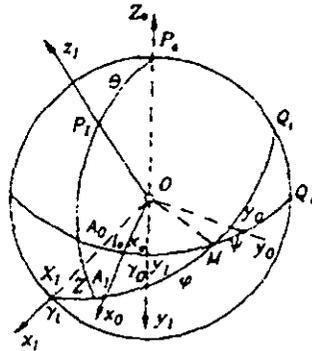


El levantamiento con GPS es un sistema de medición tridimensional basado en la observación de señales de radio emitidas por los satélites del Sistema Global de Posicionamiento NAVSTAR. Las observaciones se procesan para determinar la posición de la estación en coordenadas cartesianas (X, Y, Z), que puedan ser convertidas a coordenadas geodésicas (φ , λ , h) sobre un elipsoide de referencia. Con ligas adecuadas al sistema geodésico vertical existente y conociendo las ondulaciones geoidales, se puede calcular la altura ortométrica o elevación sobre el nivel del mar de puntos cuya elevación sea desconocida.

Existen dos métodos mediante los cuales pueden derivarse la posición de las estaciones el Posicionamiento Puntual o Absoluto y el Posicionamiento Relativo. En la forma puntual se procesa información de una sola estación para obtener sus coordenadas (X, Y, Z) referidas al WGS84, marco de referencia geocéntrico (Datum).

Para llevar a cabo levantamientos con precisiones de un decímetro o menos, debe hacerse uso de técnicas para el Posicionamiento Relativo. En este caso, dos o mas receptores reciben en forma simultanea señales de los mismos satélites geodésicos. Estas observaciones son procesadas para obtener los componentes de los vectores de la línea base, ó sea diferencias de coordenadas de las estaciones (X, Y, Z). El Posicionamiento Relativo Estático, es decir cuando el receptor/antena se mantiene inmóvil durante el periodo de observación. Este posicionamiento relativo también se encuentra denominado en la literatura como tridimensional o geométrico.





SISTEMAS DE REFERENCIA

La astronomía y la geodesia requieren de un conjunto de referencias coherentes. Este conjunto está representado por los Sistemas de Referencia Celeste y Terrestre, y la coherencia entre ambos está asegurada por las series de Parámetros de Orientación de la Tierra que dan la posición del eje instantáneo de rotación terrestre en el espacio, sobre la misma Tierra y caracterizan a la rotación de nuestro planeta.

Las técnicas espaciales contribuyen exclusivamente desde 1988 a la definición y realización de los sistemas de referencia. La interferometría de muy larga línea de base (VLBI) permite obtener el conjunto completo de parámetros que materializan a los sistemas celeste y terrestre, como también los EOP que los conectan. Las observaciones de la constelación de satélites GPS (Global Positioning System) contribuyen a la realización del marco de referencia terrestre y a la monitorización de la rotación de la tierra, al igual que la telemetría láser a satélites artificiales (Satellite Laser Ranging, SLR) y al sistema DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite).

SISTEMAS y MARCOS DE REFERENCIA

Por *Sistema de Referencia* se entiende en un sentido estricto "El conjunto de prescripciones, convenciones y el modelo requerido para definir un sistema tridimensional en cualquier instante"

De forma más simple decimos que un sistema de Referencia es una definición teórica de la posición que ocupan unos ejes en el espacio, respecto a los cuales referimos la posición de otros objetos.

Un Sistema de Referencia se denomina Inercial, si se encuentra en reposo o se mueve con velocidad constante respecto al resto del universo. En la Naturaleza no existen sistemas de referencia así, aunque en la práctica se puede considerar como sistema cuasi-inercial a uno que se encuentre en reposo o con movimiento de velocidad constante respecto a las estrellas, u otros objetos suficientemente lejanos.

Hay dos niveles fundamentales de sistemas de referencia:

1. Los Sistemas de Referencia Celestes (CRS), que son sistemas cuasi-inerciales respecto a los cuales referimos las posiciones de los objetos celestes, por ejemplo cuasares, púlsares, estrellas etc. La dirección del eje de rotación Terrestre permanece aproximadamente constante respecto a tales objetos y permite definir el sistema de referencia. Su definición genérica es un sistema Ecuatorial Absoluto cuyo plano fundamental Ecuador, el eje Z en la dirección del eje de rotación terrestre, el eje X en la dirección del punto Aries, y el eje Y formando un triedro directo, y el origen el centro de masas de la Tierra o el baricentro del sistema solar.

2. Los sistemas de Referencia Terrestres (TRS), que son sistemas ligados a la Tierra, y por tanto giran conjuntamente con la Tierra, y se trasladan. Es decir son sistemas acelerados y por tanto no inerciales. Su definición genérica es un sistema en que el plano fundamental es el Ecuador, el eje Z esta en la dirección del Eje de rotación terrestre, el eje X en la dirección intersección del meridiano de Greenwich con el Ecuador y el eje y formando triedro directo y origen el centro de masas de la Tierra.

Un *Marco de Referencia* es la materialización de un sistema de Referencia, constituido por un conjunto de coordenadas de objetos celestes, para los sistemas celestes y coordenadas y velocidades de estaciones repartidas por toda la Tierra para los terrestres.

Es muy importante en la definición de los sistemas de referencia el concepto de orientación de la Tierra, ya que es la relación entre ambos tipos de sistemas.

La orientación de la Tierra se define como la variación en términos de rotación entre un sistema Celeste y uno Terrestre, es decir un sistema geocéntrico que rota con la Tierra y uno inercial o cuasi-inercial también geocéntrico que no rota. La rotación entre estos dos sistemas se puede realizar a través de tres ángulos (ángulos de Euler), pero clásicamente se ha estudiado esta variación considerando separadamente el movimiento del eje de rotación sobre la propia Tierra, el movimiento del eje de rotación en el espacio, y la variación en la rotación de la Tierra. Esto da lugar a cinco parámetros de Orientación de la Tierra (EOP) y que son:

- . Tiempo Universal (UT1). Es la variación en tiempo universal en la duración del día ya que la Tierra no gira uniformemente.

- . Las variaciones en el Polo Celeste (dPsi, dEps). El eje de rotación, en el espacio describe dos movimientos; *precesión* y *nutación*. El modelo para estos movimientos no tiene en cuenta factores como variaciones atmosféricas, oceánicas y del interior de la Tierra, y variaciones en general de periodo corto, por tanto surgen estos dos parámetros para mejorar el modelo de precesión y nutación.

- . Coordenadas del Polo Terrestre (x, y). El eje de rotación de la Tierra no está situado siempre en el mismo lugar respecto a la propia Tierra debido a la no rigidez de la Tierra la variación respecto a la dirección del Polo Celeste viene determinada por estos parámetros.

Antes de seguir con la definición de los sistemas de referencia conviene aclarar algunas cuestiones sobre el eje de rotación y sus movimientos en el espacio y sobre la propia Tierra.

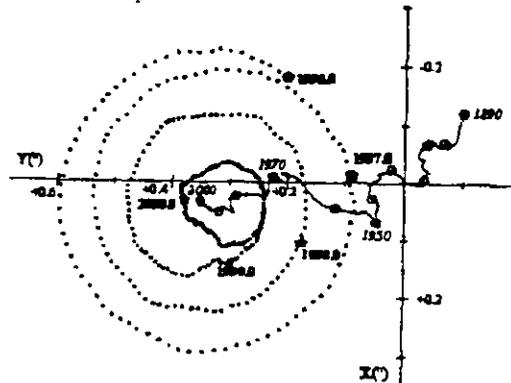
El Polo Celeste se define en Astronomía como la intersección del eje de rotación Terrestre con la Esfera celeste, y el Polo Terrestre como la intersección con la Tierra. El eje de rotación no está fijo en el espacio, y su movimiento queda caracterizado por los fenómenos ya mencionados de Precesión y Nutación. Estos movimientos se deben estudiar por separado. En cada instante la dirección verdadera del eje de rotación en el espacio define el denominado Polo instantáneo, que cortará a la esfera Celeste ya la Terrestre en un Polo Celeste Instantáneo y un Polo Terrestre instantáneo. En cada instante también, se puede definir un polo denominado MEDIO, que solo está afectado de Precesión, (equivaldría a un polo instantáneo que hubiera sido corregido de Nutación). Dado que el conocimiento sobre estos movimientos no es perfecto se definen otros Polos que son los siguientes:

CEP. *Polo celeste de Efemérides*. Es la dirección del Polo instantáneo incluyendo los modelos de Precesión y Nutación sin tener en cuenta las variaciones de corto periodo. (dPsi, dEps).

CIP. *Polo Celeste Intermedio*. Es la dirección del Polo instantáneo, donde se habrán tenido en cuenta algunas correcciones de corto periodo superiores a dos días. Esto no altera la definición de los parámetros de Orientación dPsi, dEps, que seguirán siendo necesarios para otras variaciones. Este polo es de reciente definición y se empezará a utilizar a partir del 1 enero 2003.

CIO-CTP *Origen Convencional Internacional- Polo Terrestre Convencional*. Se refieren a lo mismo aunque a lo largo del tiempo han tomado nombres diferentes. Es la media de la dirección marcada por un polo medio durante los años 1900..1906. Una vez definido queda fija tanto su

dirección sobre la Tierra como en el espacio.



La figura anterior muestra las variaciones del CEP y un polo medio, respecto a la propia corteza Terrestre, dado con un intervalo de 5 días (línea discontinua), en un sistema bidimensional con origen el CIO y ejes en las direcciones del meridiano de Greenwich y 90 Este, el polo medio tiene un movimiento irregular en la dirección de 80° W (línea continua).

EL SERVICIO INTERNACIONAL DE ROTACIÓN DE LA TIERRA (IERS)

El IERS fue establecido en 1987 por la Unión astronómica internacional y la Unión internacional de Geodesia y Geofísica y comenzó a funcionar en Enero de 1988. Sus objetivos son proporcionar a la comunidad astronómica, geodésica y geofísica una serie de marcos y sistemas de referencia para sus trabajos. Entre los objetivos prioritarios se encuentran:

1. La definición de un CRS, el Sistema internacional de referencia Celeste (ICRS) y su materialización a través del Marco internacional de referencia celeste (ICRF). (Otras materializaciones del ICRS son los catálogos estelares Hipparcos y FK5)
2. La definición de un TRS, el Sistema internacional de referencia Terrestre (ITRS) y su materialización a través del Marco internacional de referencia terrestre (ITRF). (Otros TRS son el Sistema Geodésico Mundial 84 (WGS84) que es el definido y usado por la constelación GPS y el Parametry Zemli 90 (PZ90) usado y definido por la constelación GLONASS)
3. Determinación de los parámetros de orientación de la Tierra necesarios para el estudio de la variación en la orientación de la Tierra y la transformación entre ICRF e ITRF .
4. Proporcionar datos geofísicos que permitan interpretar las variaciones espacio-temporales en el ICRF el ITRF y en los parámetros de orientación de la Tierra, así como modelos para estas variaciones
5. Establecer convenciones para que la comunidad internacional utilice los mismos modelos y constantes.

EL MARCO INTERNACIONAL DE REFERENCIA TERRESTRE ITRF2000

El ITRF es una materialización del ITRS a través de medidas de posición y velocidad de lugares alrededor de todo el mundo basadas en técnicas espaciales, que por tanto están influenciadas por múltiples factores, podemos citar los siguientes:

- . Relación entre el ICRS fijo en el espacio y el ITRS ligado a la Tierra , que viene dado por la variación en la velocidad de rotación de la Tierra

- . Coordenadas aproximadas de los lugares
- . Modelo usado para el movimiento de las placas continentales, para asignar velocidades
- . Modelo geopotencial adoptado para el campo de la gravedad terrestre.
- . Constante de gravitación utilizada para determinar la masa de la Tierra.
- . Valor usado para la velocidad de la luz.
- . Influencia de las mareas.
- . Influencia de la presión de radiación Solar .
- . Estado y deriva de los relojes en la determinación del tiempo.
- . Variaciones Atmosféricas.
- . Variaciones en las antenas receptoras.

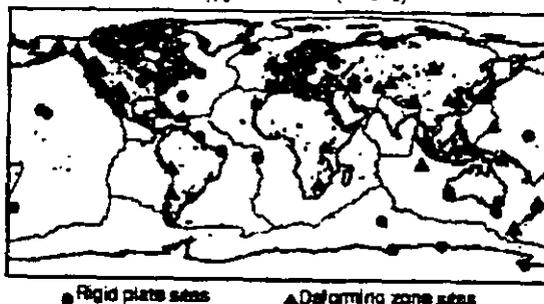
Los criterios generales adoptados para establecer el ITRF2000 son:

- 1) ITRF2000 consiste en una serie de posiciones y velocidades de unas estaciones que conforman una red global en toda la Tierra.
- 2) ITRF2000 Debe incluir todos los puntos reconocidos de utilidad para aplicaciones de Geodesia , Cartografía y Navegación
- 3) ITRF200 debe incluir una base de puntos primarios que deben ser acordes con la calidad anual de las soluciones obtenidas. Estos puntos deben mejorar las soluciones del ITRF97 al que sustituye.
- 4) Dado que existirán varios niveles de calidad en los puntos individuales los criterios de calidad deben ser cuidadosamente estimados y explicados a los distintos usuarios, y estos deben ser convenientemente publicados

Para determinar el ITRF2000 el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) recopila soluciones de posición y velocidad aportadas por distintos grupos y organismos dedicados a ello, y obtenidas por distintas técnicas (VLBI, LLR, SLR, GPS, OORIS, técnicas combinadas. etc.). La densificación se realiza en general con técnicas GPS, y hay multitud de grupos que establecen redes de densificación.

De todas las soluciones aportadas por distintos organismos tras su análisis se llegó a las siguientes estaciones seleccionadas 54 (círculos en la figura) y otras 41 (triángulos), estas últimas estaban en zonas que tenían deformaciones y al final se eliminaron. De las 54 restantes Bahrein (en la placa Árábica) Easter Island (en la placa de Nazca) , Tromsøe (En la placa Euroasiática) and Flin-Flon (en la Placa Norte- Americana) fueron excluidas por tener residuales en velocidad demasiado altos. Por tanto sólo se usaron 50 lugares localizados en placas rígidas para definir el ITRF2000

A continuación se dan la longitud y latitud en grados, código de la estación y placa a la que pertenece, de las dos estaciones españolas incluidas en la definición del marco, estación de Maspalomas (Gran Canaria), y Villafranca (Madrid).



Longitud	Latitud	Codigo	nombre	Placa continental
-15.633	27.764	31303MO02	MASP	AFRC NUBI
-3.952	40.444	13406MO01	VILL	EURA

Este marco de referencia es la última realización de una serie de marcos ITRF que se han ido mejorando desde 1988, las diferencias entre ellos es del orden de cm., y existen parámetros de transformación entre unos y otros. Las coordenadas de las estaciones quedan definidas por tres coordenadas, X, y ,x, denominadas *coordenadas geocéntricas*, si es necesario utilizar unas coordenadas (ϕ, λ) denominadas *coordenadas geodésicas* y h *altura sobre el elipsoide*. debe definirse un elipsoide de referencia cuyos ejes y origen coincidan con los del sistema. En este caso se usa el GSSO cuyos parámetros son $a=6378137.0$ m y $e^2=0.00669438003$.

SISTEMA GEODÉSICO MUNDIAL 1984 (WGS84)

Es un Sistema de referencia Terrestre definido como sigue:

Origen: Centro de masas de la Tierra.

Eje Z: Dirección del CIO

Eje X: Sobre el plano del Ecuador en la dirección de la intersección del meridiano de Greenwich.

Eje Y: Sobre el Ecuador formando triedro directo.

Plano fundamental: Ecuador

Tiene asociado un elipsoide de referencia cuyos ejes y origen coinciden con los del sistema. Los parámetros del elipsoide son:

Semieje menor $a=6378137$ m.

Aplanamiento $f=1/298.257223563$

El sistema se define para una Tierra estándar rotando con velocidad constante alrededor de un polo medio, incluye por tanto un modelo de Tierra que queda definido por una serie de parámetros primarios y secundarios

- . Los parámetros primarios son velocidad angular de rotación y la masa del elipsoide, que coincide con la masa de la Tierra incluida su atmósfera.
- . Los parámetros secundarios definen el modelo de gravedad utilizado, y que está formado por los coeficientes de la expresión en armónicos esféricos del potencial gravitatorio terrestre truncados en el orden 180.

El sistema queda materializado por la posición de 5 estaciones, que son las encargadas de controlar los satélites de la constelación GPS, constituyendo así un marco de referencia terrestre.



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

Este marco de referencia es la última realización de una serie de marcos WGS, la diferencia entre ellos es del orden de 2 a 3 metros.

El WGS 84 es consistente con el ITRF2000. Las diferencias entre ellos son de 10 cm.

La posición de un lugar sobre la Tierra en este sistema queda definida por tres coordenadas, X,Y,Z ,

que se denominan coordenadas geocéntricas, o bien por (φ , λ) denominadas *coordenadas geodésicas* y h *altura sobre el elipsoide*.

1.- GEODESIA POR SATÉLITE.

La Geodesia por Satélite, es la ciencia que estudia la utilización de las observaciones a los satélites naturales de la Tierra y los planetas, para la solución de los problemas científicos. La Geodesia por Satélite es la mas nueva de las ramas de la Geodesia y la que se desarrolla con mayor rapidez, la geodesia por satélite da la posibilidad de obtener soluciones con gran precisión, en un tiempo mas corto que con los métodos tradicionales. La tarea fundamental de la Geodesia por Satélite es la determinación de las constantes fundamentales que caracterizan las formas, dimensiones y rotaciones diarias de la Tierra, Luna y Planetas; así como el estudio de las variaciones en el tiempo de las constantes fundamentales. Otra tarea es la elaboración de un sistemas de coordenadas geocéntricas y planetario céntricas cuya solución conduce a la construcción de redes de puntos de apoyo para construir un sistema único de coordenadas para la Tierra (ó Planetas)el cual tiene como origen el centro de masas y sus ejes direccionales en determinada forma se fijan para diferentes épocas.

1.1.-Definición de Geodesia Satelital.

De acuerdo a la definición clásica de F.R. Helmert (1880), la Geodesia es la ciencia de la medición de la Tierra y la representación de su superficie terrestre y oceánica por métodos cartográficos, esta definición incluye la determinación del campo de gravedad externo de la Tierra.

La Geodesia satelital comprende la técnicas de observación y cálculo que permiten la solución de problemas geodésicos con el uso de mediciones precisas hacia, desde o entre satélites artificiales cercanos a la Tierra. Siguiendo la definición de Helmert, la cual básicamente aún es válida, los objetivos de la Geodesia satelital todavía son considerados de una manera funcional, también incluyen, debido a la creciente precisión de las observaciones, variaciones dependientes del tiempo.

Los problemas básicos son:

- 1) Determinación precisa de posiciones tridimensionales globales, regionales y locales (ejemplo: establecimiento de control geodésico.)
- 2) Determinación del campo de gravedad terrestre y funciones lineales de su campo (ejemplo: geoide).
- 3) Mediciones y modelación de fenómenos geodinámicos (ejemplo: movimiento polar, rotación de la Tierra, deformación de placas, etc).

El uso de los satélites artificiales en geodesia tienen algunos prerrequisitos; estos son básicamente un conocimiento comprensivo del movimiento de los satélites bajo las influencias de todas las fuerzas actuales, así como la descripción de las posiciones de los satélites y de las estaciones terrestres en marcos de referencia adecuados.

Consecuentemente la Geodesia satelital pertenece al dominio de las ciencias básicas. Por otro lado, cuando las observaciones a los satélites se utilizan para resolver varios problemas, la geodesia satelital puede asignarse al campo de las ciencias aplicadas. Si consideramos la naturaleza de los problemas, la Geodesia satelital pertenece por igual a las geociencias y las ciencias de la ingeniería.

En virtud de su creciente precisión y rapidez, los métodos de la geodesia satelital son más y más utilizados en otras disciplinas, como Geofísica, Oceanografía, Navegación, etc.

Desde el lanzamiento del primer satélite artificial, SPUTNIK-1 el 4 de Octubre de 1967, la geodesia satelital se ha desarrollado en un auto contenido en la investigación y la enseñanza geodésica. Las tareas y el contenido se deben al desarrollo histórico.

En Astronomía geodésica, basada en las reglas de la astronomía esférica, la orientación del vector local de gravedad (longitud geográfica Ω , latitud geográfica Φ), y el azimut astronómico A de una marca terrestre se determinan de la observación a cuerpos celestes naturales, particularmente estrellas fijas. Por gravimetría, entendemos la medición de la gravedad (intensidad de la gravedad g) la cual es la magnitud del vector de la aceleración de la gravedad g . Con mediciones geodésicas terrestres, ángulos horizontales, distancias, ángulos zenitales y diferencias de alturas niveladas se obtienen y sirven para la determinación de la localización de puntos en la superficie. En geodesia satelital, finalmente, basado en la observación de cuerpos celestes artificiales, direcciones, distancias y diferencias de distancias se determinan entre estaciones terrestres y satélites o entre satélites.

Los resultados de observaciones geodésico-astronómicas o gravimétricas se utilizan se utilizan dentro del campo de la Geodesia Física y astronómica para la determinación de la figura y el campo de gravedad de la Tierra. En alemán, este dominio clásico se le llama "Erdmessung" y corresponde al concepto de Geodesia Global en idioma español. Los principales problemas son la determinación de un elipsoide terrestre promedio y un geoide preciso.

La determinación de coordenadas en un sistema de coordenadas tridimensional o elipsoidal, basado principalmente en mediciones geodésicas terrestres, es tratado en el campo de la Geodésica Matemática. Expresiones alternativas para este dominio son la Geodesia Geométrica o en alemán "Landesvermessung"; la clasificación separada de las técnicas de observación – y computación-, como ha sido desarrollada dentro del campo clásico de la práctica y la enseñanza geodésica, no ha ocurrido en la misma extensión con la Geodesia por Satélite. Aquí observación, cálculo y análisis son generalmente tratados juntos. En lo que concierne a problemas globales, la geodesia satelital contribuye a la geodesia global. En problemas locales y regionales, la geodesia satelital forma parte del levantamiento. Recíprocamente, los campos de la geodesia matemática y la astronomía geodésica proporcionan fundamentos importantes en la geodesia satelital con respecto a los sistemas de referencia. Lo mismo es verdad para el campo de la geodesia física y Astronomía, la cual proporciona información del campo de gravedad de la Tierra. Debido a todas estas

interacciones, una separación definida de los diferentes campos en geodesia se hace cada vez más difícil.

El término Geodesia Satelital es mas restrictivo que la denominación francesa Geodesia Espacial o la expresión mas generalizada "Técnicas Espaciales", Este último término incluye la observación geodésica de la Luna, así como el uso de los planetas y objetos fuera del sistema solar, por ejemplo la interferometría. Ocasionalmente se utiliza el término Geodesia Global, donde lo global se refiere a las aplicaciones y a las técnicas de medición globales.

En este curso se emplea el término Geodesia Satelital, porque su uso es ya común, porque los satélites artificiales cercanos son casi de uso exclusivo para las observaciones que son de interés en geodesia aplicada. (véase figura 1.1)

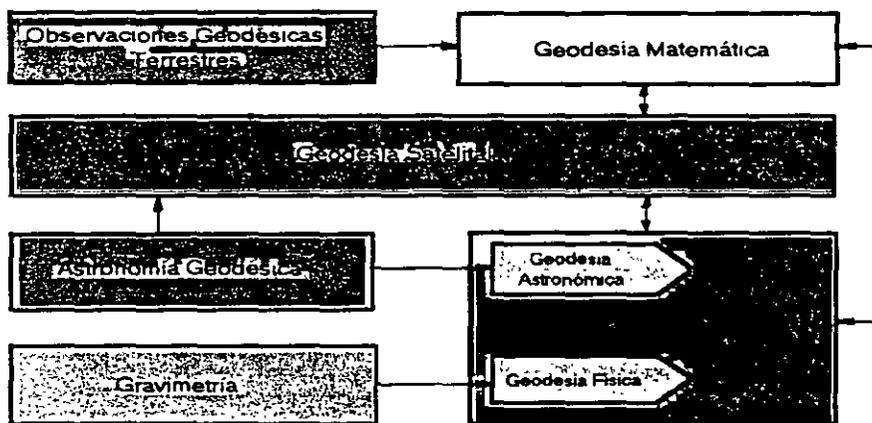


Fig.1.1: Principales relaciones entre campos de enseñanza e investigación geodésicos

1.2.- Clasificación y Conceptos Básicos de la Geodesia

La importancia de los satélites artificiales en geodesia, se hace evidente de acuerdo a las siguientes consideraciones básicas.

(1) Los satélites pueden usarse como punterías altas orbitantes, las cuales son visibles a largas distancias. Siguiendo los conceptos clásicos de las redes trigonométricas terrestres, los satélites pueden considerarse como puntos de control fijos de una red terrestre tridimensional global. Si los satélites son observados simultáneamente desde diferentes estaciones terrestres, no importa que las órbitas de los satélites artificiales estén gobernados por fuerzas gravitacionales. Solo se utiliza la propiedad de que ellos son punterías a grandes alturas. Estas consideraciones puramente geométricas nos llevan al método geométrico de la geodesia satelital. Esto ha sido realizado en su forma mas pura a través de la red mundial BC4. (véase figura 1.2)

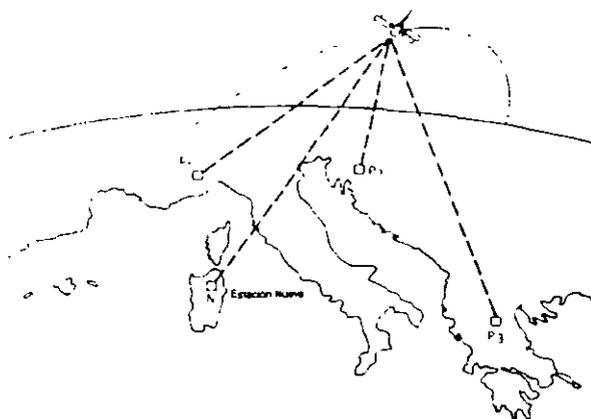


Fig. 1.2: Metodo Geométrico. El satélite es una puntana alta

Comparado con las técnicas clásicas, la principal ventaja de los métodos satelitarios es que pueden salvar grandes distancias, y por lo tanto establecer ligas geodésicas entre continentes e islas. Todas las estaciones terrestres que pertenecen a la red, pueden determinarse en un sistema de coordenadas global, uniforme y tridimensional.

Ellos forman un poliedro alrededor de la Tierra.

A principios de 1878 H. Burns propuso tal concepto, llamado mas tarde como la jaula de Burns. Burns consideraba este objetivo como uno de los problemas básicos de la geodesia científica. La idea, sin embargo, no pudo realizarse con los métodos clásicos y fue olvidada. El método geométrico de la geodesia satelital es también llamado el método directo, a causa de que la posición particular del satélite entra directamente en la solución.

(2) Los satélites pueden considerarse una prueba o sensor en el campo de gravedad de la Tierra. El movimiento orbital y la variación de los parámetros que describen la órbita se observan para sacar conclusiones sobre las fuerzas actuantes. De un particular interés es la relación entre las características del campo de gravedad de la tierra y las desviaciones resultantes de la verdadera órbita del satélite con respecto al movimiento Kepleriano imperturbado. El valor esencial del satélite es que es un cuerpo en movimiento dentro del campo de gravedad de la tierra. Este punto de vista nos lleva al método dinámico de la geodesia satelital.

La principal ventaja de las observaciones satelitales, cuando se comparan con las técnicas clásicas, es que los resultados toman a la tierra como un todo y que ellos tienen un carácter global por naturaleza. Intervalos con ausencia de datos son de la menor importancia. Entre los primeros resultados espectaculares fueron un valor razonablemente preciso del achatamiento de la tierra, y la prueba de que la figura de la tierra no es simétrica con respecto al ecuador.

En la geodesia satelital dinámica se consideran arcos orbitales de diferentes longitudes. Cuando se utilizan arcos de longitud desde unos cuantos minutos hasta varias revoluciones

alrededor de la tierra, hablamos de técnicas de arco corto; el término para arcos largos, de hasta 30 días y mas es la técnica de arcos largos. Las órbitas se describen en marcos geocéntricos de referencia adecuados. El satélite puede considerarse como el “portador de sus propias coordenadas”. Las coordenadas geocéntricas de las estaciones terrestres rastreadoras pueden derivarse de las órbitas conocidas de los satélites. (figura 1.3)

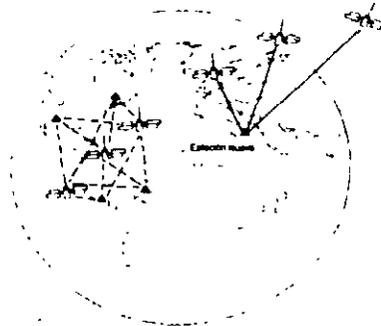


Fig. 1.3- Método Orbital. El satélite es un sensor del campo de gravedad de la Tierra y es portador de sus propias coordenadas

Este es el llamado método orbital para la determinación de coordenadas.

La determinación combinada de los parámetros del campo de gravedad y las coordenadas geocéntricas dentro del dominio de la geodesia satelital dinámica nos lleva al problema general de la determinación de parámetros o estimación de parámetros. Esto puede incluir la determinación de los parámetros rotacionales de la tierra (movimiento de rotación y movimiento polar) así como otros fenómenos geodinámicos.

El método dinámico de la geodesia satelital es también caracterizada como el método indirecto, debido a que los parámetros requeridos se determinan implícitamente a partir del comportamiento orbital de los satélites. La distinción geométrico-dinámico tiene, por muchos años, caracterizado el desarrollo de la geodesia satelital. Hoy, la mayoría de las técnicas actuales tienen que considerarse como combinaciones de ambos puntos de vista.

Una clasificación mas de las técnicas de observación se refiere a la relación entre la plataforma de observación y la plataforma de puntería.

Distinguimos a los siguientes grupos:

- (1) Métodos de tierra a espacio
 - Direcciones de observaciones con cámara
 - Distancia Laser
 - Posicionamiento Doppler (TRANSIT)
 - Uso geodésico del Sistema Global de Posicionamiento (GPS)
- (2) Métodos de espacio a tierra
 - Altimetría por radar
 - Laser Spaceborne
 - Gradiometría satelital
- (3) Métodos espacio a espacio

- Rastreo de satélite a satélite (SST)

1.3 Desarrollo histórico de la Geodesia del Satelital

El propio desarrollo de la geodesia satelital empezó con el lanzamiento del primer satélite artificial SPUTNIK-1 el 4 de octubre de 1957. Las raíces de este desarrollo, pueden sin embargo, identificarse desde antes. Cuando nosotros incluimos el uso del satélite natural de la tierra, la luna, que entonces la geodesia satelital, dinámica ha existido desde principios del siglo 19. En 1802, Laplace determinó a partir del movimiento nodal lunar, el achatamiento de la tierra $f = 1/303$. Otras soluciones vinieron después con Hansen (1864) con $f = 1/296$, Helmert (1884) con $f = 1/297.8$, y Hill (1884) con $f = 1/297.2$ (cf. Wolf 1985, Torge 1991).

La metodología geométrica en geodesia satelital, también tiene algunos precursores en los métodos lunares que han sido desarrollos comprensivos desde el principio de este siglo. En este contexto, la luna se, consideró como un blanco geométrico, donde las coordenadas geocéntricas son conocidas de la teoría orbital. Las direcciones entre el observador y la luna son determinadas de las medidas relativas a las estrellas cercanas o de ocultación de estrellas por la luna. Se reciben coordenadas geocéntricas por eso. Dentro del marco Geofísico Internacional del Año 1957/58 un primer resultado de un programa global se obtuvo con la Cámara Lunar de rango Dual, desarrollado por Markovitz (1954). Se trataron los métodos de esta así llamada Geodesia Cósmica muy comprensivamente en 1960 por Berroth y Hofmann. Ellos también forman una parte considerable dentro del libro clásico de Mueller (1964) "la Introducción a la Geodesia Satelital."

Se dieron mas fundamentos a la geodesia del satélite antes del año 1957 e.g. por el trabajo de Vaisala (1946), Brouwer (1959), King-Hele (1958) y O'Keefe (1958). Por consiguiente, fue posible obtener importantes resultados Geodésicos, muy pronto, después del lanzamiento de los primeros cohetes y satélites. Uno de los primeros resultados excelentes fue la determinación del achatamiento de la tierra con $f = 1/298.3$ de las observaciones de EXPLORER-1 y SPUTNIK-2 por O'Keefe (1958), Rey-Hele y Merson (1958). Algunos eventos significativos durante los años que siguen de 1957 son

- 1957 Lanzamiento de SPUTNIK-1
- 1958 Achatamiento de la tierra de los Datos del Satélite ($f = 1/293.3$)
- 1959 Lanzamiento de EXPLORER-1
- 1960 Tercer Zonal Armónico (Forma de la Pera de la tierra)
- 1959 Teoría del Movimiento de Satélites Artificiales (Brouwer)
- 1961 Lanzamiento de TRANSIT-1B
- 1960 Lanzamiento de ECHO-1
- 1960 Teoría de Órbitas Satelitarias (Kaula)
- 1962 Lanzamiento de ANNA-1B
- 1962 Conexión Geodesica entre Francia y Argelia (IGN).

Por el año 1964, muchos problemas básicos de la geodesia habían sido tomados con éxito, al saber:

- determinación de un valor numérico preciso del achatamiento de la tierra.
- determinación de la forma general del geoide global.

-determinación de conexiones entre los datums geodésicos más importante (a ± 50 m).
Con el desarrollo de la geodesia del satélite esta puede ser dividido en tres fases.

1. 1958 a alrededor de 1970. El desarrollo de métodos básicos para las observaciones satelitales, y para el cómputo y para el análisis de órbitas satelitales. Esta fase se caracterizada por la determinación óptico-fotográfica de direcciones con cámaras. Los resultados principales eran la determinación de los coeficientes armónicos principales del geopotencial, y la publicación de los primeros modelos de la tierra, los modelos estándar de la Tierra de el Observatorio Astrofísico Smithoniano (SAO SE I a SAO SE III), y los Modelos de la Tierra Goddard (GEMA) del centro de vuelos espaciales Goddard de la NASA. La única red puramente geométrica mundial y satelital fue establecidas por observaciones con cámaras BC4 a satélites PAGEOS.
2. 1970 hasta alrededor de 1980. Fase de los proyectos científicos. Nueva técnica de observación, se desarrolló y se refinó. en particular las mediciones láser a los satélites y a la luna, así como altimetría por satélites. El sistema del TRÁNSIT se usó para el Posicionamiento geodésico Doppler. Se llevaron a cabo las determinaciones globales refinadas del Geoide y de las coordenadas y llevó a modelos mejorados de la tierra (e.g. GEM 10, GRIM). La exactitud aumentada de las observaciones hizo posible la medida de fenómenos geodinámicos (rotación de tierra, movimiento polar, la deformación de la corteza terrestre). El levantamiento Doppler se usó mundialmente para la instalación y mantenimiento de redes de control Geodésicas (e.g. EDOC, DÓDOC, ADOS).
3. 1980 en adelante. La fase del uso operacional de las técnicas satelitarias en geodesia, geodinámica, y topografía. Dos aspectos son en particular notables. Los métodos satelitaríos son usados cada vez más por la comunidad topográfica que reemplazando los métodos convencionales. Este proceso empezó con los primeros resultados obtenidos con el Sistema de la Posicionamiento Global (GPS). NAVSTAR Producirá completamente nuevas perspectivas en topografía y cartografía. El segundo aspecto involucra el aumento de las observaciones. Un resultado es el reemplazo casi por completo de las técnicas de astronomía clásicas para el control del movimiento Polar y la rotación de tierra por métodos satelitaríos. Los proyectos para la medida de movimientos de corteza terrestre están dándose a lo largo del mundo.

1.4 Aplicaciones de la Geodesia Satelital

Las aplicaciones de los métodos de la geodesia satelital, son determinadas para la precisión requerida y el esfuerzo requerido para hacer el gasto en equipo de computación un amplio catalogo de aplicaciones puede ser preciso, dado el gran desarrollo de los métodos en tiempo real o cercano a un tiempo - real. La figura 1.4 presenta las relaciones entre las diferentes técnicas de observación y la precisión para determinar la posición relativa de puntos. El actual

interés en el uso de los métodos setelitarios para las tareas practicas en Geodesia claramente visibles.

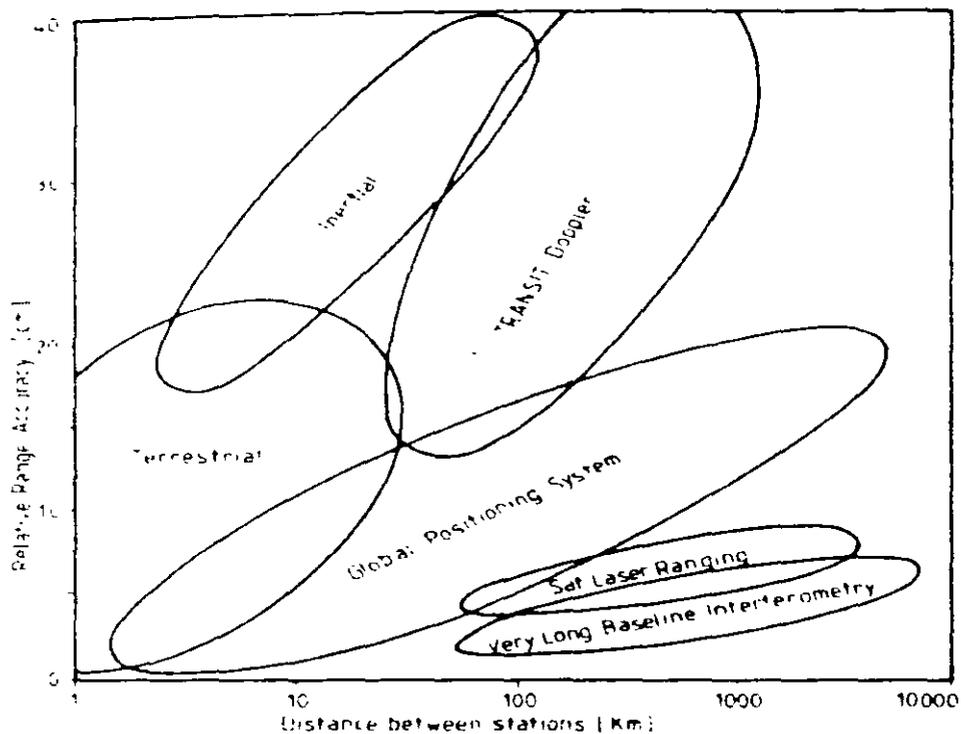


Fig. 1.4: Tabla de precisiones en la determinación de posiciones relativas con diferentes técnicas geodésicas.

Iniciaremos con las tres tareas básicas de la Geodesia satelital, vistas en (1.1); podemos dar un buen resumen de las posibles aplicaciones.

GEODESIA GLOBAL:

- * Forma general de la Tierra y su campo gravitatorio.
- * Dimensiones del elipsoide terrestre promedio.
- * Establecimiento de referencia terrestre global.
- * Geoide, detallado como superficie de referencia en la tierra y en el mar.
- * Conexión entre los diferentes datums Geodésicos.
- * Conexión entre datums nacionales y los datums geodésicos globales.

CONTROL GEODESICO:

- * Establecimiento de una red de control geodésico nacional.
- * Instalación de una red homogéneas tridimensional.
- * Análisis y mejoramiento de la red territorial existente.
- * Establecimiento de una conexión geodésica entre islas y continentes.

- * Densificación de la red existente suficiente para acortar levantar distancias de intersección.

GEODINAMICA:

- * Control de puntos, el movimiento de la corteza terrestre.
- * Movimiento polar, rotación de la tierra.
- * Mareas terrestres.

APLICACIONES DE LA GEODESIA PLANA:

- * Levantamiento topográficos (catastro urbano, topografía urbana y rural, sistemas de información geográfica (SIG), demarcación de límites, etc.
- * Instalación de una red especial para el control de tareas de ingeniería.
- * Control de puntos terrestres para fotogrametría y percepción remota.
- * Posición y orientación de cámaras fotogramétricas.
- * Control de puntos para cartografía en expediciones.

GEODESIA PARA NAVEGACIÓN Y MARINA:

- * Navegación precisa de tierra - mar - vehículos aéreos.
- * Posicionamiento preciso para mapas marinos, exploración, hidrografía, oceanografía, geología marina y geofísica.
- * Unificación de sistemas de altura terrestres.

RELACIÓN DE CAMPOS.

- * Determinación de la velocidad y posición para observaciones geofísicas (gravimétricos, magnéticos, reconocimiento sísmico.) También en el mar y en el aire.
- * Determinación de movimiento de hielo en Glaciología, investigación oceanográfica en el antártico.

Sistemas satelitarios operacionales, donde casi no hay límite a las posibles aplicaciones.

2. Elementos Físicos y Matemáticos de la Geodesia Satelital

2.1.- Sistemas de Coordenadas de Referencia

Los Sistemas de coordenadas de referencia son esencialmente para la descripción del movimiento de los satélites, la representación de las observaciones y la representación e interpretación de los resultados. El incremento de la precisión de muchas técnicas de observación satelitales requieren un incremento correspondiente en la precisión de los sistemas de referencia

Los sistemas de coordenadas de referencia en Geodesia satelital son globales y geocéntricos por naturaleza, porque el movimiento satelital se refiere al centro de la masa de la tierra.

Las medidas terrestres son por naturaleza local en carácter y son usualmente descritas en los sistemas de coordenadas de referencia local. La relación entre ambos sistemas debe ser conocida con suficiente precisión.

Desde la posición relativa y los cambios de orientación con el tiempo. El registro y modelado del tiempo de observación también juegan un papel importante.

Se debe hacer notar que los resultados de los diferentes métodos de observación en Geodesia satelital se refieren a los sistemas de coordenadas de referencia particular los cuales son relacionados a los métodos individuales. Estos sistemas particulares no son necesariamente idénticos porque ellos pueden ser basados en diferentes definiciones. Frecuentemente la relación entre este sistema particular es conocida con una precisión muy baja que la precisión de las técnicas de observación particular. El establecimiento de formulas de transformación precisos entre sistemas es una de las más importantes tareas en Geodesia Satelital

En recientes publicaciones algunos autores distinguen entre sistema de referencia y marco de referencia (Moritz, Muller 1987, Kovalevsky et al. 1989. ef). El primer termino es entendido como la idea conceptual de un sistema de referencia incluyendo la teoría fundamental y estandares, mientras el segundo término significa su realización practica a través de observaciones y ser un arreglo de coordenadas estacionarias.

2.1.1.- Sistema de coordenadas Cartesianas y Transformaciones de Coordenadas

En un sistema de coordenadas Cartesianas con ejes X, Y, Z, la posición de un punto P determinado por vector de posición:

$$X_p = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} \quad \text{Donde } X_p, Y_p, Z_p \text{ son números reales.}$$

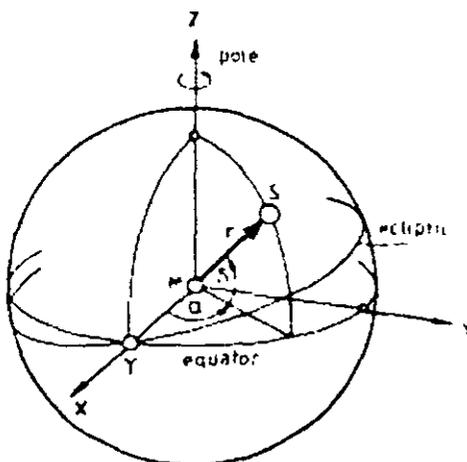


Fig.2.2: Sistema Ecuatorial en

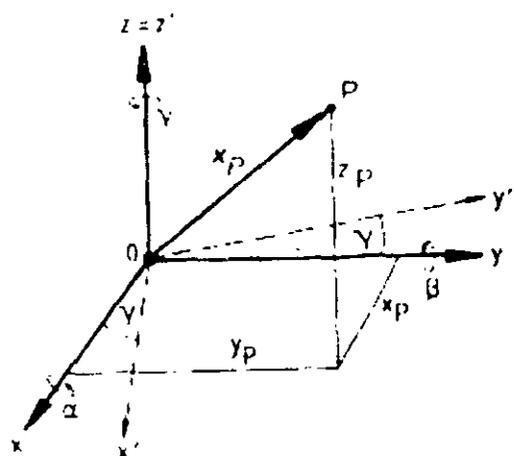


Fig.2.1: Sistema de Coordenadas Cartesianas

La transformación a un segundo sistema de coordenadas cartesianas con origen idéntico y con los ejes X, Y, Z; el cual es generado por el primero, por una giro alrededor del eje Z, por el ángulo γ que puede ser conocido a través de la matriz de operación:

$$X_p = R_3(\gamma)X_p \quad (2.2)$$

con

$$R_3(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \text{sen} \gamma & 0 \\ \text{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Rotaciones equivalentes R1 alrededor del eje x y R2 alrededor del eje Y son:

$$R_1(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \text{sen} \alpha \\ 0 & -\text{sen} \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad R_2(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\text{sen} \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

La representación es válida para el sistema de coordenadas de la mano derecha. Alguna transformación de coordenadas puede ser conocida a través de una combinación de rotaciones. La transformación completa es:

$$X_p = R_1(\alpha)R_2(\beta)R_3(\gamma) \quad (2.4)$$

Las propiedades matemáticas de las matrices de rotación son directas usando álgebra lineal siguiendo las reglas, que son de mucha importancia:

- 1) La rotación no cambia el tamaño de un vector de posición
- 2) La multiplicación de matrices no es conmutativa

$$R_1(\mu)R_3(\nu) \neq R_1(\mu)R_3(\nu) \quad (2.5)$$

- 3) La multiplicación de matrices es asociativa

$$R_1(R_2 R_3) = (R_1 R_2) R_3 \quad (2.6)$$

- 4) La rotación alrededor de los mismos ejes son aditivas

$$R_1(\nu)R_1(\mu) = R_1(\nu + \mu) \quad (2.7)$$

- 5) El inverso y el transpuesto son iguales

$$R_1^{-1}(\mu) = R_1^T(\mu) = R_1(-\mu) \quad (2.8)$$

- 6) La siguiente relación también es válida

$$(R_1 R_2)^{-1} = R_2^{-1} R_1^{-1} \quad (2.9)$$

La polaridad de los ejes de coordenadas puede cambiar con la reflexión de las matrices

$$S_1 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Finalmente, la matriz por una rotación general de los ángulos: α, β, γ es:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \operatorname{sen} \gamma & \operatorname{sen} \beta \\ \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta \cos \gamma - \cos \alpha \operatorname{sen} \gamma & \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \operatorname{sen} \beta \cos \beta \\ \cos \alpha \operatorname{sen} \beta \cos \gamma + \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \gamma & \cos \alpha \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

La relación entre el vector de posición en dos sistemas de coordenadas de rotación arbitrarias, es entonces:

$$X_p'''' = R X_p; \quad X_p = R^T X_p'''' \quad (2.12)$$

En geodesia satelital los ángulos de rotación son frecuentemente muy pequeños, estos permiten el uso de la linealización de R.

Con $\cos \alpha \cong 1$ and $\alpha \cong \alpha$ en radianes, entonces el orden de los términos, es el que sigue:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

2.1.2.- Sistemas de Coordenadas de Referencia en Geodesia Satelital

Dos sistemas son los requeridos

- Un espacio fijo, un sistema inercial de referencia (CIS), para la descripción del movimiento satelital
- Una tierra fija, sistema terrestre de referencia (CTS) por la posición de las estaciones de observación y por la descripción de resultados en Geodesia Satelital.

Las leyes de Newton del movimiento son solamente validas en un sistema de referencia inercial, por ejemplo un sistema de coordenadas en reposo o en un estado de movimiento rectilíneo uniforme sin ninguna aceleración. La teoría de movimiento por satélites artificiales es desarrollada con respecto a tal sistema. El sistema ecuatorial dado en una época T_0 , es usado en astronomía esférica produce una buena aproximación a un sistema de referencia inercial. Para el tiempo siendo conocido a través de un catalogo de posiciones y del movimiento propio para un número dado de estrellas fundamentales (FK5) (Fricke 1985) sumado a un sistema de constantes astronómicas (USNO 1983).

El origen del sistema es supuesto a coincidir con el geocentro M. El eje Z positivo orientado hacia el polo norte y el eje positivo X para el primer punto de aries □ El eje Y completa un sistema de la mano derecha. Tal sistema de referencia es nombrado “Sistema Inercial Convencional” (CIS) para distinguirlo de otro sistema inercial. Desde el centro de masa de la tierra (el origen de este sistema de referencia) se experimenta pequeñas aceleraciones por el movimiento anual alrededor del sol, el término “casi-inercia”, es también usado.

La transformación de las coordenadas esféricas α, δ, r en las coordenadas cartesianas X, Y, Z es

$$\begin{aligned} X &= r \cos \delta \cos \alpha \\ Y &= r \cos \delta \operatorname{sen} \alpha \\ Z &= r \operatorname{sen} \delta \end{aligned} \quad (2.14)$$

Las fórmulas inversas son:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \alpha &= \arctan \frac{Y}{X} \\ \delta &= \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

En astronomía esférica r es usualmente definido como el radio de unidad. Nosotros podemos considerar la esfera celeste como una unidad esférica y aplicar las formulas básicas de la geometría esférica. La información detallada en astronomía esférica pudo ser encontrada en el Green (1985) o en libros de texto en geodesia astronómica (e.g. Mackier 1985, Sigl 1975).

La precisión del sistema de referencia, es conocida a través del catalogo FK5, es aproximadamente 40.1. La precisión no es suficiente para las necesidades modernas. Un considerable avance o desarrollo, por uno o dos grados de magnitud, es conocido con satélites astronómicos como e HIPPARCOS(Kovalevsky,1986,1990). Otra posibilidad para una realización n mucho más precisa de un sistema de referencia de espacio fijo es el uso de fuentes de radio extragalácticas (Quasar),(VLBI) la cual usara radio telescopio. La conexión entre la estrella fundamental FK5 y la estrella de radio tenue serán conocidas vía misión espacial como el telescopio del espacio. In un futuro una realización dinámica de un sistema de referencia inercial a través de orbitas satelitales podrá ser posible (e.g. Moritz,1985) El sistema FK5, en relación a la época estándar J2000 ha sido usado como cometa convencional CIS desde el primero de enero de 1988.

Un apropiado sistema de referencia de tierra fija debe ser conectado de una manera bien definida con la corteza de la Tierra. Tal Sistema Convencional Terrestre (CTS) puede ser realizado a través de un sistema de coordenadas cartesianas de estaciones fundamentales con una red de trabajo global. Actualmente es posible establecer a través de la dirección convencional , la principal orientación del eje de la polar y una longitud cero en el ecuador (Greenwich Mean Observator).

El Sistema Terrestre Convencional (CTS) es también llamado Sistema de Tierra Centra y Tierra Fija (ECEF).

La transformación del sistema de espacio fijo ecuatorial (CIS) al sistema terrestre convencional (CTS) es conocido a través de secuencias de rotación por

- precisión

- nutación
- Rotación de tierra incluyendo el movimiento polar

Este puede ser descrito con operaciones de matrices. Un punto en la esfera celeste, describe la posición del vector r , nosotros podemos escribir entonces:

$$r_{CTS} = SN Pr_{CTS} \quad (2.16)$$

Los elementos de las matrices de rotación deben ser conocidas con suficiente precisión para cada etapa de observación. Estas estaciones son ahora consideradas en más detalle.

a) Precesión y Nutación

Los ejes de la tierra de rotación y sus planos ecuatorial no son fijos en el espacio pero rota respecto a un sistema inercial. Estos resultados provienen de la atracción gravitacional de la luna y el sol en un movimiento de pandeo ecuatorial de la tierra. El movimiento total es compuesto de un componente secular principal (precesión) y un componente periódico (nutación)

La posición y orientación del plano ecuatorial y el primer punto de Aries es llamado ecuador principal y equinoccio principal, respectivamente, cuando solamente la influencia de la precesión es considerada. Cuando la nutación es tomada para el conteo, son llamados ecuador verdadero y equinoccio verdadero. Las coordenadas de estrellas respectivas son: la posición principal y la posición verdadera. La posición principal puede ser transformada desde la etapa de referencia t_0 (J2000) para la observación requerida en la etapa t usando la matriz de precesión:

$$P = R_3(-z)R_2(\theta)R_3(-\zeta) \quad (2.17)$$

con tres rotaciones con los ángulos: $-z, \theta, -\zeta$

$$\begin{aligned} \zeta &= 0^\circ.6406161 T + 0^\circ.0000839 T^2 + 0^\circ.0000050 T^3 \\ z &= 0^\circ.6406161 T + 0^\circ.0003041 T^2 + 0^\circ.0000051 T^3 \\ \theta &= 0^\circ.5567530 T - 0^\circ.000185 T^2 - 0^\circ.0000116 T^3 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$T = (t-t_0)$ es contado desde el siglo Juliano de 365.25 días.

La transformación del ecuador principal y el equinoccio en el ecuador y equinoccio verdaderos respectivamente esta dado por etapas de observación, y es representada con una matriz de nutación:

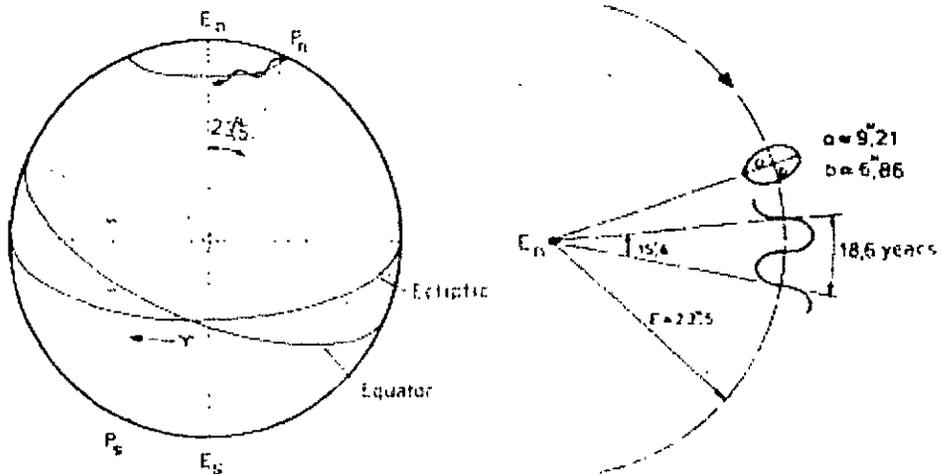
$$N = R_1(-\varepsilon - \Delta\varepsilon)R_3(-\Delta\varphi)R_1(\varepsilon) \quad (2.19)$$

donde:

- ε = oblicuidad de la eclíptica
- $\Delta\varepsilon$ = nutación en la oblicuidad
- $\Delta\varphi$ = nutación en longitud (en la eclíptica)

y

$$\varepsilon = 232621.448 - 46.815T - 0.00059T^2 + 0.001813T^3$$



Precesión y Nutación

Fig.2.3: Precesión y Nutación; El eje de rotación de la Tierra Pn, describe un cono alrededor del Polo Eclíptico En

En 1980 la Unión Internacional de Astronomía (IAU) adopto, una teoría basada en un modelo elástico de la tierra. $\Delta\psi$ es trabajada en la computadora usando series de expansión resolviendo 106 coeficientes y $\Delta\varepsilon$ usa uno de 64 coeficientes. Los principales elementos

son:

$$\Delta\psi = -17.196\text{sen}\Omega - 1.3187\text{sen}(2F - 2D + 2\Omega) - 0.2274\text{sen}(2F - 2\Omega) \quad (2.20)$$

$$\Delta\varepsilon = 9.2025\text{cos}\Omega + 0.5736\text{cos}(2F - 2D + 2\Omega) + 0.0927\text{cos}(2F - 2\Omega)$$

con:

- Ω = longitud principal de un nodo lunar ascendente
- D = Elongación principal de la luna desde el sol

$$F = \lambda_M - \Omega$$

Más detalles pueden ser encontrados en Melbourne (1983), USNO(1983), McCarthy (1980) Para la aplicación a la transformación de coordenadas nosotros obtenemos las coordenadas verdaderas.

$$r_1 = (X_T, Y_T, Z_T)$$

en el sistema ecuatorial instantáneo.

b) Rotación de la Tierra y Movimiento Polar:

Par la transformación de un sistema ecuatorial de espacio fijo instantáneo a un sistema de referencia terrestre convencional, nosotros necesitamos tres parámetros; son parámetros de rotación de la tierra (ERP), o parámetros de orientación de la tierra(EOP), El tiempo sideral aparente de Greewich (GAST) y las coordenadas polares (X_p, Y_p)

Sin la presesión y la nutación, los parámetros de rotación no pueden ser descritos con la teoría pero deben ser determinados con observaciones actuales con un tiempo internacional y un servicio de latitud. En los últimos 80 años, más o menos, este servicio fue basado principalmente en observaciones astronómicas. El primero de enero de 1988 el Servicio Internacional de la Rotación de la Tierra (IERS)(Boucher et al1988) adquirió esta tarea. Las principales técnicas de observación son usadas ahora como laser ranging para satélites y para la luna.

Fig.2.4 muestra la situación geométrica para la transformación, del sistema terrestre fijo es conocido a través de la orientación convencional de un sistema cartesiano (X, Y, Z)er. El eje Z_{cr} esta en dirección hacia el polo terrestre convencional CTP, y el eje X_{cr} hacia el meridiano de Greenwich. La posición relativa del polo verdadero instantáneo con respecto al polo terrestre convencional CTP es usualmente descrito a través de las coordenadas polares X_p, Y_p .

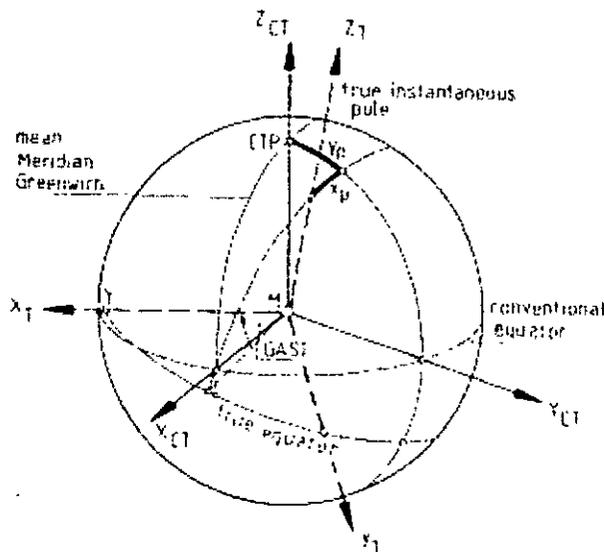


Fig.2.4: Sistema Terrestre Convencional Medio y Verdadero Instantáneo

La orientación relativa del eje Xcr depende directamente en la rotación de la tierra y es determinada a través del aparente tiempo sideral de Greenwich. El símbolo \square es usado frecuentemente para denotar GAST. La matriz que transforma el sistema de espacio fijo instantáneo a un sistema convencional terrestre es:

$$S = R_2(-x_p)R_1(-y_p)R_3(GAST) \quad (2.21)$$

$$R_3(GAST) = \begin{pmatrix} \cos(GAST) & \text{sen}(GAST) & 0 \\ -\text{sen}(GAST) & \cos(GAST) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

y, para los ángulos pequeños:

$$\begin{aligned} R_2(-x_p)R_1(-y_p) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_p & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -y_p \\ 0 & y_p & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Para propósitos prácticos, el polo del sistema instantáneo ecuatorial de espacio fijo verdadero puede ser considerado idéntico al llamado "*Polo Celestial Efemérides*" (CEP).

El CEP es definido para ser el polo de referencia para la computación del movimiento polar y nutación y es libre de los términos nutación casi diurna con respecto a la corteza de la tierra y al espacio inercial. (USNO 1983).

Hasta el presente día el *Origen Convencional Internacional* (CIO-polo) es usualmente seleccionado como CTP. Es definido como la orientación principal del eje de rotación entre 1900 y 1905. El meridiano principal de Greenwich, también es llamado el Observatorio Principal de Greenwich (GMO) es definido a través de longitudes nominales de todas las observaciones las cuales contribuyen al servicio de tiempo internacional (Bureau International de Heure) (BIH). Porque de la inclusión de las nuevas técnicas de observación satelital y

estaciones adicionales para la determinación del tiempo y coordenadas durante la última década, esta definición no fue muy larga. Fue puesta en una fundación boarder con la introducción del Nuevo servicio de rotación internacional de la tierra (IERS).

En un futuro, los CTS serán definidos por una red de trabajo global de estaciones fundamentales de quienes las coordenadas son determinadas por las más precisas técnicas de observación. Los cambios de coordenadas, causados por el reciente movimiento de Crustal, son también consideradas. EN 1984 el Bereau International de Heure(Bill) introduce un sistema de referencia terrestre, llamado BTS (BIH sistema Terreste), y este sistema es ahora nominado como el IERS, Terrestrial Reference Frame (TTRF).

La ecuación puede ser resuelta solamente por iteración, porque ρ y h también van en presenta el sentido de la mano derecha (2.32). La convergencia es referida desde $h \ll N$.

Un sistema elipsoidal local, unido a la vertical elipsoidal n en el punto de observación P , puede ser definido como:

Con las especificaciones:

- origen en el punto de observación P
- el eje Z_e en la dirección de la vertical del elipsoide
- el eje X_e en dirección al norte (meridiano geodésico)
- el eje Y_e en dirección al este, completando un sistema de mano izquierda.

La localización de un segundo punto P_i , en el sistema elipsoidal local, puede ser determinado por las siguientes características (coordenadas polares)

- slant range S
- azimuts elipsoidales A
- Direcciones elipsoidales o ángulos horizontales φ, λ
- Ángulos zenitales elipsoidales Z

Las coordenadas esféricas locales s, ϕ, λ . son asignadas a las coordenadas cartesianas locales

La formula inversa es la misma como (fig.2.28), par una más amplia lectura en la computadora elipsoidal y en el uso de un sistema de coordenadas planas (como UTM) ver libros de texto en geodesia matemática (Torge 1991, Gro \square mann 1976, Vanicek, Krakiwsky 1982)

2.1.3 Sistema de coordenadas de referencia en el campo de gravedad de la Tierra.

Las observaciones geodésicas terrestres, con la excepción slant ranges s , son relacionadas con el vector local de gravedad g . Ellos debido a eso pueden fácilmente ser descritos en un sistema de coordenadas de referencia local el cual es ligado a la dirección de la línea de la plomada h en el punto de observación P .

La orientación del vector n es usualmente determinado por las observaciones astronómicas y ser descritas como:

- Latitud astronómica ϕ , y
- La longitud astronómica Δ

$$h = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \Delta \\ \cos \phi \operatorname{sen} \Delta \\ \operatorname{sen} \phi \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

La relación entre el sistema astronómico local, diferido con:

- el origen en el punto de observación P.
- El eje Z' en dirección al zenit astronómico
- El eje X' en dirección al norte (meridiano astronómico)
- El eje Y' en dirección al este.

Y es sistema convencional global (CTS), es mostrado en la fig 2.5 (Torge 1980 a). La localización del punto P_i en el sistema astronómico local es derivado de observaciones terrestres:

- azimut astronómico A
- direcciones horizontales (diferencia de azimut)
- slant ranger S
- ángulo zenital Z

y puede escribirse como:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} \cos A \operatorname{sen} Z \\ \operatorname{sen} A \operatorname{sen} Z \\ \cos Z \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

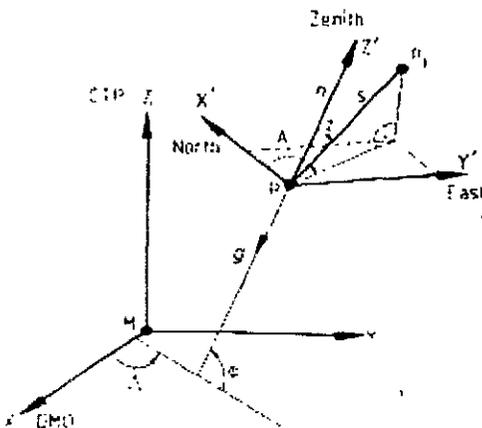


Fig.2.5: Sistema Astronómico Local y Sistema Terrestre Global

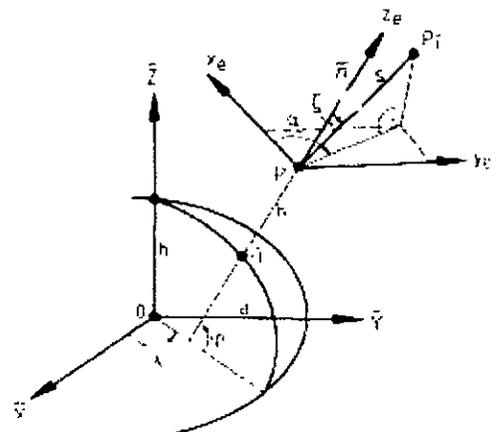


Fig.2.6: Sistema Elipsoidal Global y Local

La diferencia de coordenadas observadas pueden ser transformadas del sistema local en el sistema global (CTS) usando:

$$\Delta X' = A \Delta X \quad (2.26)$$

con

$$A = R_3(180^\circ - \Delta) R_2(90^\circ - \phi) S_2 \quad (2.27)$$

La matriz S_2 cambia la orientación del eje Y u convierte un sistema de coordenadas de mano izquierda a uno de mano derecha. La formula explicita de A es:

$$A = \begin{pmatrix} -\operatorname{sen}\phi \cos \Delta & -\operatorname{sen}\Delta & \cos \phi \cos \Delta \\ -\operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\Delta & \cos \Delta & \operatorname{sen}\phi \\ \cos \phi & M & 0 \quad \operatorname{sen}\phi \end{pmatrix}$$

La formula inversa es (Torge 1991)

$$\Delta X' = A' \Delta X \quad (2.28)$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} -\operatorname{sen}\phi \cos \Delta & -\operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\Delta & \cos \phi \\ -\operatorname{sen}\Delta & \cos \Delta & 0 \\ \cos \phi & M & \cos \phi \operatorname{sen}\Delta \quad \operatorname{sen}\phi \end{pmatrix}$$

La formula (2.26) y (2.28) son usadas en la combinación de resultados de las observaciones terrestres locales y de las técnicas satelitales, también en el sistema cartesiano saludable, también es el sistema cartesiano global o en el sistema astronómico local.

2.1.4 Sistema de coordenadas esféricas elipsoidales.

Para más aplicaciones practicas los sistemas de coordenadas elipsoidales son preferidos por que ellos esta aproximadamente mas cerca de la superficie de la Tierra, y ellas facilitan una separación de la posición horizontal y la altura. Usualmente un elipsoide en rotación es achatado en los polos lo cual es creado por la rotación del elipsoide meridiano cerca de su eje menor b.

Los parámetros geométricos son:

$$\begin{aligned} \text{Semieje mayor: } & a \\ \text{Achatamiento } & f = \frac{a-b}{a} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Alternativamente, la primera excentricidad numérica e es usada

$$e^2 = 2f - f^2 \quad ; \quad 1 - e^2 = (1 - f^2).$$

Una mejor aproximación en general de la tierra es un sistema elipsoidal global (fig. 2.6)

Las coordenadas elipsoidales geográficas son:

ϕ = latitud elipsoidal

λ = longitud elipsoidal

h = altura elipsoidal

Un sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z puede ser definido como el elipsoide

- Origen en el centro O del elipsoide
- Eje Z en dirección al polo norte elipsoidal (a lo largo del eje menor)
- Eje X en dirección al meridiano cero elipsoidal
- Eje Y completando el sistema de mano derecha.

La ecuación de transformación entre las coordenadas geográficas elipsoidales ϕ, λ, h y las coordenadas cartesianas X, Y, Z , es:

$$X = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \phi \operatorname{sen} \lambda \\ (1-e^2)N+h \operatorname{sen} \phi \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

N es el radio de curvatura en el primer vertical

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \operatorname{sen}^2 \phi}} = \frac{a}{\sqrt{1-f(2-f) \operatorname{sen}^2 \phi}} \quad (2.31)$$

Una solución del problema inverso es

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \phi} - N$$
$$\phi = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N+h} \right) \quad (2.32)$$
$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$

La ecuación puede ser resuelta solamente por iteración, porque ϕ y h también representa el sentido de la mano derecha (2.32). La convergencia es referida desde $h < N$.

Un sistema elipsoidal local, unido a la vertical elipsoidal n en el punto de observación P , puede ser definido como:

$$n = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \operatorname{sen} \lambda \\ \operatorname{sen} \varphi \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Con las especificaciones:

- origen en el punto de observación P
- el eje Ze en la dirección de la vertical del elipsoide
- el eje Xe en dirección al norte (meridiano geodésico)
- el eje Ye en dirección al este, completando un sistema de mano izquierda.

La localización de un segundo punto Pi, en el sistema elipsoidal local, puede ser determinado por las siguientes características (coordenadas polares)

- slant range S
- azimuts elipsoidales Δ
- Direcciones elipsoidales o ángulos horizontales φ, λ
- Ángulos zenitales elipsoidales Z

Las coordenadas esféricas locales s, φ, λ , son asignadas a las coordenadas cartesianas locales

$$x_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos \varphi \operatorname{sen} \lambda \\ \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \lambda \\ \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Para la transformación de diferencias de coordenadas del sistema local al sistema global elipsoidal, nosotros obtenemos la relación

$$\Delta X = R_3(180 - \lambda) R_2(90 - \varphi) S_2 \Delta x_e = A \Delta x_e \quad (2.35)$$

La fórmula inversa es la misma como (fig.2.28), par una más amplia lectura en la computadora elipsoidal y en el uso de un sistema de coordenadas planas (como UTM) ver libros de texto en geodesia matemática (Torge 1991, Großmann 1976, Vanicek, Krakiwsky 1982).

2.1.5 Elipsoide, geoide y datum geodésicos.

La forma física de la Tierra es una aproximación cercana a una superficie matemática del elipsoide de rotación.

La superficie elipsoidal es lisa y conveniente par las operaciones matemáticas. Esto es porque el elipsoide es ampliamente usado como la superficie de referencia para las coordenadas horizontales en redes de trabajo geodesicas.

De otra manera, el elipsoide, es mucho menos manejable como una superficie de referencia para coordenadas verticales (alturas).

En otro caso, el geoide es usado. Es definido como una superficie de niveles del campo de gravedad e cual determina el nivel del mar, y puede extenderse dentro del cuerpo sólido de la tierra (Torge 1991). La relación entre el geoide y el elipsoide es ilustrada en la fig. 2.7.

La separación vertical entre el geoide y una referencia particular en el elipsoide es llamada ondulación geoidal N . Os valores numéricos de las ondulaciones evidentemente dependen en particular del elipsoide. Para una referencia elipsoidal global, ellas pueden alcanzar hasta 100m. La relación geométrica entre la ondulación geoidal N , la altura elipsoidal h y la altura ortométrica H (Observadas del Spirit Levelling) es aproximadamente (ver también fig 2.28)

$$h = N + H \quad (2.36)$$

Es evidente que la ondulación geoidal N debe ser conocida cuando las observaciones en geodesia Satelital (las alturas elipsoidales) y de geodesia terrestre (conocidas las alturas definidas en el campo de gravedad) son usadas en un ajuste combinado. Este aspecto deberá ser tratado con más detalle más adelante.

El ángulo ζ entre las direcciones de la normal elipsoidal y la línea de la plomada en el punto P , es llamada la "Deflexión de la vertical" fig 2.7. Usualmente, ζ es dividida en 2 componentes y definida como (Torge 1991)

$$\begin{aligned} \xi &= \Phi - \varphi \\ \eta &= (\Delta - \lambda) \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.37)$$

φ, λ, Δ son obtenidas de observaciones astronómicas y Δ de observaciones geodésicas. Las deflexiones de la vertical son también nombradas deflexiones astro-geodésicas. Los parámetros que definen un elipsoide local fueron usualmente estimados de tal manera que la distribución de deflexiones conocidas de la vertical cumpliera alguna condición mínima en el proceso de ajuste. Los elipsoides relacionados locales son por tanto los más adecuados.

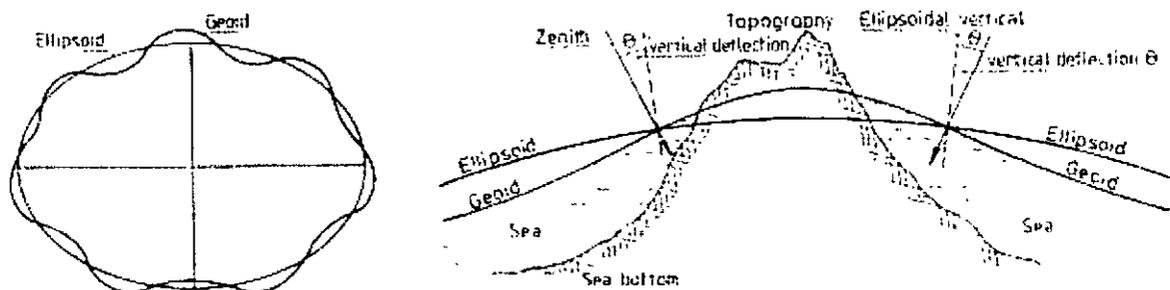


Fig.2.7:Relación entre Elipsoide y Geoide

Un sistema global elipsoidal es relacionado a un elipsoide de referencia como la figura más adecuada a la Tierra en general. El origen del elipsoide es supuesto a coincidir con el centro de masa de la Tierra. Además las direcciones de los ejes elipsoidales son definidos entonces como paralelos par el sistema convencional de referencia terrestre (CTS). El establecimiento de parámetros que describe la relación entre un elipsoide particular local y un sistema de referencia geodésico global, es llamado "Datum Geodésico".

Un datum geodésico es definido por un establecimiento de cinco parámetros

- a semieje mayor del elipsoide de referencia
- f achatamiento

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ coordenadas del origen del elipsoide con respecto al geocentro (parámetros de traslado al datum)..

para $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0$, el datum geodésico es llamado un datum absoluto. El sistema de referencia geodésico 1980 (GRS1980).

Pertenece a este grupo:

- $a = 6\,378\,137$ m
- $f = 1/298.2572$

Además las constantes de GRS1980 son (Moritz1992), la constante gravitacional geocéntrica, a la Tierra (incluyendo a la atmósfera).

$$GM = 398\,600.5 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1}$$

La forma dinámica de la Tierra (relacionada a 1)

$$J_2 = 0.00108263$$

Y la velocidad angular principal de la Tierra

$$\varepsilon = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

Para un número largo de sistemas locales particulares de referencia, las renombradas constantes de cambio del datum o parámetros variables del datum ΔX , ΔY , ΔZ pueden ser derivadas de observaciones satelitales. Ellas representan, como siempre, solamente una posición principal del sistema particular local con respecto al sistema –geocéntrico–.

En la practica el establecimiento del datum geodésico local no siempre realiza el objetivo de los ejes paralelos del CTS. Existe en particular el caso para muchos dátums nacionales existentes.

Fuera de esta razón una transición de un sistema de coordenadas elipsoidales de referencia a otro, también incluye rotaciones. Usualmente tales transformaciones de datum son establecidas entre el sistema cartesiano. Cuando en una formulación con coordenadas elipsoidales son requeridas las ecuaciones (2.30) a (2.32) tienen también que ser aplicadas.

Una ecuación de transformación completa de datum entre dos sistemas cartesianos requiere parámetros (fig.2.8)

- 3 traslados ΔX , ΔY , ΔZ
- 3 rotaciones ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z
- 1 factor escala m

En muchos casos los ángulos de rotación son muy pequeños por tanto:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1+m) \begin{pmatrix} 1 & \epsilon_x & -\epsilon_x \\ -\epsilon_y & 1 & \epsilon_y \\ \epsilon_z & -\epsilon_z & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

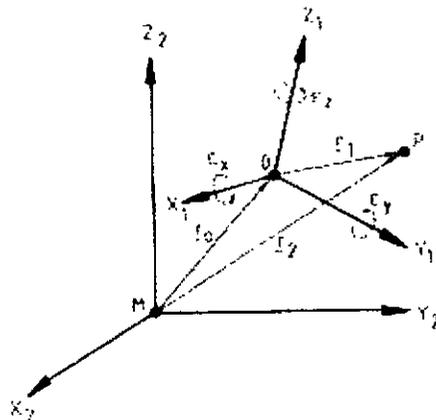


Fig.2.8: Transformación de Datum entre 2 Sistemas Cartesianos

Para las áreas limitadas solamente tres parámetros locales o de transición regional pueden ser suficientes.

El número de parámetros de datum incrementa a nueve cuando los parámetros de un elipsoide tiene que ser considerados. El número es entonces incrementado cuando las rotaciones específicas son permitidas por partes de la red de trabajo terrestre (Hoyer 1982, Krakiwsky, Thomson 1974) y cuando la información del datum es derivada de las áreas orbitales del satélite. En el último de los casos, los coeficientes potenciales del campo de gravedad esten bien como algunas constantes fundamentales como pueden ser, la rotación de la Tierra, la velocidad de la luz, la constante gravitacional egocéntrica, que provienen de la definición de datum. Un ejemplo de un grupo más reciente es el sistema Geodésico mundial (World Geodetic System WGS) y su predecesor (Hata 1986) WGS72. Los parámetros importantes son dados en la tabla 2.1.

Parámetros	Nombre	WGS72	WGS84
Semieje mayor	a	6378135 m	6378137 m
achatamiento	f	1/298.26	1/298.257223563
Velocidad angular	ϵ	7.291215147 $\times 10^{-5}$ rad s ⁻¹	7.292115 $\times 10^{-5}$ rad s ⁻¹
Geocentro	GM	398600.8 Km ³ s ⁻²	398600.5 Km ³ s ⁻²
Cte gravitacional 2nd zona armónica	C ₂₀	-484.1605 $\times 10^{-6}$	-484.16685 $\times 10^{-6}$

WGS84 basada en el campo de gravedad de grados y orden n=m=180. Entonces solamente los coeficientes crecientes hasta n=m=16 han sido publicados. Para más información a cerca del WGS84 ver ejemplo con et al 1989, Lohmar 1988.

Las ecuaciones siguientes pueden ser usadas para transformaciones de coordenadas entre WGS72 y WGS84

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \lambda \\ h \end{pmatrix}_{WGS72} + \begin{pmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\lambda \\ \Delta h \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}\Delta\varphi[\cdot] &= (4.5 \cos \varphi)(a \Delta \text{sen} \varphi) + (\Delta f \text{sen} \varphi) \\ &\quad + (\Delta f \text{sen} 2\varphi / \text{sen} \varphi) \\ \Delta\lambda[\cdot] &= 0.554 \\ \Delta h[m] &= 4.5 \text{sen} \varphi + a \Delta f \text{sen}^2 \varphi - \Delta a + \Delta r\end{aligned}\tag{2.40}$$

$$\begin{aligned}\Delta f &= 0.3121057 \times 10^{-7} \\ a &= 6378135m \\ \Delta a &= 2.0m \\ \Delta r &= 1.4m\end{aligned}$$

La latitud es contada positivamente al norte, y la longitud positiva al este.

Las coordenadas geocéntricas absolutas de la estación de observación, cuando han sido derivadas de las observaciones satelitales con TRANSIT(6) o GPS, han sido usualmente derivadas estándar en varios metros o incluso decenas de metros. Es evidente que la transformación del datum con (2.4) no puede mejorar la precisión de medición. El significado de una transformación de la fórmula general (2.40) no debe ser sobreestimado.

2.1.6 Cálculos de la Excentricidad en 3 dimensiones

Cuando se realizan observaciones al satélite desde estaciones con maracas excéntricas, es usualmente necesario proveer la excentricidad de un sistema de coordenadas cartesianas egocéntricas. Los elementos elipsoidales observados o disponibles previamente $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ y Δh tienen que ser transformados en elementos cartesianos ΔX , ΔY y ΔZ

. Comenzando con aproximaciones de coordenadas elipsoidales φ , λ y h de la estación central y los parámetros a y e , se sigue de la (2.30)

$$\begin{aligned}dX &= -(\bar{M} + h) \sin \varphi \cos \lambda d\varphi - (\bar{N} + h) \cos \varphi \sin \lambda d\lambda + \cos \varphi \cos \lambda dh \\ dY &= -(\bar{M} + h) \sin \varphi \sin \lambda d\varphi + (\bar{N} + h) \cos \varphi \cos \lambda d\lambda + \cos \varphi \sin \lambda dh \\ dZ &= (\bar{M} + h) \cos \varphi d\varphi + \sin \varphi dh\end{aligned}$$

donde:

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \text{sen}^2 \varphi)^{1/2}}, \quad N = \frac{a}{(1-e^2 \text{sen}^2 \varphi)^{1/2}}\tag{2.41}$$

y son los radios meridianos de curvatura y el radio de curvatura en la primera vertical, respectivamente. Para propósito prácticos de expresión diferencial puede ser remplazado por cantidades pequeñas finitas. Los algoritmos es solamente valida para excentricidades pequeñas.

La fórmula inversa es

$$\begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-\operatorname{sen}\varphi \cos \lambda}{M+h} & \frac{-\operatorname{sen}\varphi \operatorname{sen}\lambda}{M+h} & \frac{\cos\alpha\varphi}{M+h} \\ \frac{-\operatorname{sen}\lambda}{(N+h)\cos\varphi} & \frac{\cos\lambda}{(N+h)\cos\varphi} & 0 \\ \frac{\cos\varphi \cos \lambda}{\cos\varphi \operatorname{sen}\lambda} & \frac{\cos\varphi \operatorname{sen}\lambda}{\operatorname{sen}\varphi} & \operatorname{sen}\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

2.2 Sistemas de Tiempo

2.2.1 Consideraciones básicas

Tres grupos básicos de escalas de tiempo son de importancia en geodesia por satélite

(1) la orientación tiempo-terrestre de la tierra con respecto al espacio inercial se exige para relacionar las observaciones a un marco de la referencia espacio-fijo. La escala de tiempo apropiada esta conectado con la rotación diurna de la tierra, y se llama tiempo sidereal o el tiempo universal.

(2) para la descripción de movimiento del satélite necesitamos una medida de tiempo estrictamente uniforme que puede usarse como la variable independiente en las ecuaciones de movimiento. Una escala de tiempo apropiada puede derivarse del movimiento orbital de la tierra alrededor del sol. Se llama Tiempo Dinámico

(3) la medición precisa del tiempo de recorrido de la señal, ej. satélite láser ranging, requiere una uniforme y accesible escala de tiempo con resolución alta. La medida apropiada se relaciona a los fenómenos de física nuclear y se llama Tiempo Atómico.

Todas éstas escalas de tiempo están basadas en la observación de los fenómenos astronómicos o físicos repetitivos. El intervalo de tiempo entre dos fenómenos consecutivos y la forma medida de la escala de tiempo particular. Un cierto múltiplo o fracción de la escala de medida se llama unidad de tiempo. En general, el segundo (s) se usa como la unidad de tiempo básica. Se derivan unidades de tiempo más grandes, como días o años, del segundo.

Dentro de la escalas de tiempo un punto de partida u origen tiene que ser establecido. Esto puede lograrse a través de un cierto evento astronómico. como la posición particular de una estrella, o el tránsito meridiano de un objeto celeste en particular.

El momento de ocurrencia de un fenómeno u observación puede relacionarse a una cierta lectura de la escala de tiempo en particular, y da el establecimiento del evento, En astronomía a semejante evento se llama época de la observación. Con respecto a la escala de tiempo en particular la determinación de la época refleja una medida de tiempo absoluta. Para muchos propósitos, el ej. para la determinación del tiempo de recorrido de la señal, una medida de tiempo relativa, es decir la determinación del intervalo de tiempo entre dos épocas, es suficiente. En muchos casos la medida de tiempo relativa puede hacerse muy más precisa que la medida de tiempo absoluta. En geodesia por satélite el establecimiento de un evento se llama a menudo tiempo-marcado o tiempo-de marcación, ej. cuando se considera el momento de transmisión o recepción—de una señal.

Hablando estrictamente, nosotros tenemos que distinguir entre el concepto ideal de una escala de tiempo y la realización práctica a través de las observaciones. Esto se hace particularmente evidente con el tiempo atómico, cuando nosotros comparamos la definición del segundo de tiempo atómico con su realización práctica a través de un grupo de relojes atómicos individuales. Una escala de tiempo puede considerarse como una aproximación al concepto de tiempo en particular. En lo siguiente no usaremos esta distinción. Para más lectura vea ej. Becker (1975, 1979), Suerte (1983), Guinot (1989a,b). Una fuente útil sobre tiempo en relación a GPS es Rizos, Grant (1990).

Para satisfacer todos los requisitos, relacionados con la ciencia y tecnología, las relaciones entre las diferentes escalas de tiempo tienen que establecerse con la mayor exactitud posible. La Fig. 2.9 ilustra cómo los errores de tiempo en geodesia por satélite se relacionan a un error de posición de

1 cm:

1cm de movimiento de un punto en el ecuador causado por la rotación de tierra corresponde aproximadamente a 2×10^{-5} s

1cm de movimiento en la órbita de un satélite cercano-tierra corresponde a aproximadamente a 1×10^{-6} s

1 cm en la distancia del satélite derivada de tiempo de viaje de la señal (ejemplo distancia laser) corresponde a aproximadamente 1×10^{-10} s.

Los requerimientos relacionados de la exactitud para la determinación de tiempo (dti) son como sigue:

$$\begin{aligned} dT_1[s] &\leq 2 \times 10^{-5} \text{ para la rotación de tierra} \\ dT_2[s] &\leq 1 \times 10^{-6} \text{ para el movimiento orbital} \\ dT_3[s] &\leq 1 \times 10^{-10} \text{ para el tiempo de recorrido de la señal} \end{aligned} \tag{2.43}$$

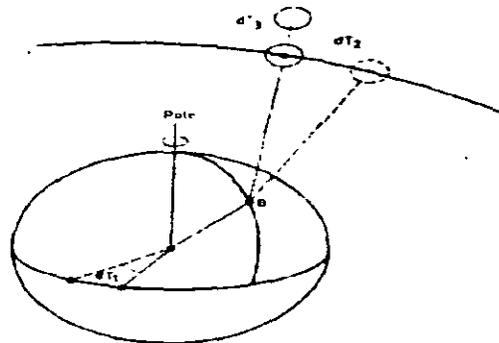


fig. 2.9 Efectos y errores cronometrados en geodesia satelital.

2.2.2 Tiempo sidereal y Tiempo Universal

El tiempo sidereal y el tiempo universal están directamente relacionados con la rotación de la tierra, y son por lo tanto escalas de tiempo equivalentes. El Tiempo sidereal igual al ángulo horario del equinoccio vernal γ , y por consiguiente depende de la longitud geográfica de la estación de observación particular. De la Fig. 2.10 nosotros podemos derivar fácilmente las relaciones siguientes. El tiempo sidereo local aparente (verdadero)(LAST) referido al equinoccio vernal verdadero.

LAST = el ángulo horario Local del equinoccio vernal verdadero.

Para Greenwich nosotros obtenemos el tiempo sidereal de Greenwich evidente (GAST)

GAST = Angulo horario del equinoccio vernal verdadero

El equinoccio vernal está sujeto a la nutación en longitud (fig. [2.1.2]). Quitando el término de nutación, obtenemos el Tiempo Sidereal medio Local (LMST), y el tiempo medio de Greenwich sidereal (GMST), respectivamente.

LMST = el ángulo horario Local del equinoccio vernal medio

GMST = el ángulo horario de Greenwich del equinoccio vernal medio

A la diferencia entre los tiempos siderales aparente y medio se le denomina la ecuación de los Equinoccios.

$$GMST - GAST = \Delta\phi \cos\epsilon \quad (2.44)$$

con $\Delta\phi$ la nutacion en longitud. Para la longitud Δ del meridiano local

$$GMST - LMST = GAST - LAST = \Delta. \quad (2.45)$$

El tiempo sideral aparente se usa para la evaluación de observaciones astronómicas. Sin embargo, para la construcción de una escala de tiempo, solamente el tiempo sideral medio se usa.

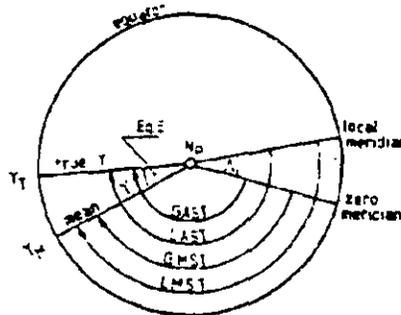


fig. 2.10 Definición de tiempo sideral.

La unidad fundamental es el Día Sideral medio, definido como el intervalo entre dos tránsitos sucesivos del equinoccio vernal medio por el meridiano. El día sideral medio no corresponde exactamente a una revolución completa de la tierra en su eje del giro con respecto al espacio inercial, porque la posición del equinoccio vernal es afectado por la precesión. La diferencia diaria es $0'' .0084$, con el día sideral que es más corto.

Para los propósitos prácticos una escala de tiempo se requiere que corresponda al movimiento diurno medio del sol. El ángulo horario del sol verdadero experimenta variaciones bastante grandes durante el año, causado por la declinación cambiante del sol y la órbita elíptica de la tierra. Por consiguiente, esta medida no es conveniente para una escala de tiempo uniforme. Es por consiguiente substituido por un Sol medio imaginario que se mueve en el plano del ecuador con velocidad constante. El Día Solar medio se define así como el intervalo entre dos tránsitos sucesivos del sol medio imaginario por el meridiano. Tiempo Solar medio es moderado por el ángulo horario del sol medio. El ángulo horario Greenwich del sol medio se llama Tiempo Universal (UT). Para los propósitos prácticos el día empieza a medianoche, por lo tanto:

$$UT = 12h + \text{el ángulo horario Greenwich del sol medio.} \quad (2.46)$$

Ambos conceptos de tiempo están basados en la rotación de la tierra, y se relacionan estrechamente entre si. El tiempo universal puede ser considerado como una forma especial de tiempo sideral. La diferencia en la longitud del día para ambas definiciones es de alrededor de 4 minutos, porque el movimiento diurno de la tierra en su órbita incrementa $360^\circ/365 \cong 1^\circ$. La relación es aproximadamente :

$$1 \text{ día sideral medio} = 1 \text{ día solar medio} - 3^m 55.909 \quad (2.47)$$

El tiempo universal original UT_0_B que se obtiene de las observaciones en una estación particular B todavía es afectado por las influencias dependientes de la localidad de la actual posición del polo verdadero. La reducción al polo terrestre convencional (CTP) causa un cambio, $\Delta\Delta_p$ en longitud. El tiempo universal que esta referido al CTP se nombra:

$$UT1 = UT0_B + \Delta\Delta_p. \quad (2.48)$$

El UT1 es la escala de tiempo fundamental en astronomía geodésica y geodesia satelital, porque define la orientación actual del sistema terrestre convencional con respecto al espacio. El UT1 es también la escala de tiempo básica para la navegación. El UT1 contiene, sin embargo, todas las variaciones de la rotación de la tierra, y no es por lo tanto una escala de tiempo uniforme. La relación fundamental entre UT1 y GMST fue reformulada por la Unión Astronómica Internacional (IAU), y desde 01.01.1984 se han definido como

$$\text{GMST at } 0^h \text{ UT1} = 6^h 41^m 50.^s 5481 + 8640184.^s 812866 T_u \quad (2.49) \\ + 0.^s 093104 T_u^2 - 6.^s 2 \times 10^{-6} T_u^3$$

T_u es el intervalo de tiempo de la época J2000 estándar, 1 de enero de 12h UT1, contados en siglos del calendario Juliano de 365.25 días. Para más información vea ej. el Aoki et al. (1982), verde (1985), o el "el Suplemento al Almanaque 1984 Astronómico" (USNO 1983).

2.2.3 Tiempo dinámico

Una escala de tiempo estrictamente uniforme puede encontrarse en los argumentos independientes de las teorías de dinámica y de las efemérides, i.e. las posiciones tiempo-dependientes de cuerpos celestiales, descritos en marcos de la referencia adecuados. Las escalas de Tiempo que son basadas en tales conceptos se llaman Tiempo Dinámico; ellos cumplen la mejor la idea del concepto de Tiempo Inercial. Nosotros tenemos que distinguir entre dos escalas de tiempo dinámicas. El Barycentric Dynamical Time (Temps Dynamique Barycentrique, TDB) se deriva de movimientos orbitales se referidos al barycentro del sistema solar, y el Tiempo Dinámico Terrestre (Temps Dynamique Terrestre, TDT) referido al geocentro.

En el concepto de Relatividad General un reloj, moviéndose con la tierra, experimenta variaciones periódicas de 1.6 milisegundos, causado por el movimiento anual dentro del campo de gravedad del sol. Este efecto, sin embargo, no debe ser considerado en el cómputo de las órbitas de satélite cercanos a la tierra, porque los satélites se mueven junto con la tierra. Esto es por qué Tiempo Dinámico Terrestre (TDT) se usa para los cálculos geocéntricos en geodesia satelital. Una ventaja mas es, que comparado con el Barycentric Dynamical Time (TDB), el TDT es independiente de teorías planetarias dinámicas. En la terminología de Relatividad General el término Coordenada tiempo se usa para TDB y el termino tiempo apropiado para TDT. El tiempo dinámico se ha usado como argumento para las efemérides astronómicas desde el 1 de enero de 1984.

El precursor del TDB fue el Ephemeris Time ET. Formalmente, el Segundo efemérico se definió como un cierto fragmento del Año 1900 Tropical, y fue por lo tanto estrictamente el uniforme. En la práctica, el tiempo de efemérides se derivó de las observaciones lunares, sin consideraciones relativistas con el fin de dar continuidad, el TDB fue puesto fijo igual al ET a principios del 1° de enero de 1984.

2.2.4 Tiempo atómico

La escala de tiempo atómico internacional TAI (Temps Atomique International) fue introducido para reunir los requisitos para una fácilmente accesible y estrictamente uniforme escala de tiempo. La unidad del tiempo atómico se seleccionó de tal manera que es igual a la duración del segundo del efemérides. La definición del segundo de la escala de tiempo atómica ha sido formulada por la 13 Conferencia del Comité Internacional de Pesos y Medidas en París, 1967, como sigue

El segundo es la duración de 9 192 631 770 periodo de la radiación
Correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos
del estado de tierra del átomo de Cesio 133. (2.50)

Ésta también es la definición de la unidad de tiempo del Sistema Internacional de Unidades (S I). La escala de tiempo atómico internacional es mantenida por la Sección de Tiempo del Departamento Internacional de Pesos y Medidas (Departamento Internacional de pesos y medidas), (BIPM) en París, basado en las lecturas de un número grande de relojes atómicos en varios laboratorios. El departamento Internacional de l'Heure (BIH) era responsable por mantener las escalas de tiempo atómicas hasta los 31 del 1987 de diciembre.

En la práctica, las escalas de tiempo atómicas se derivan de los grupos de estándares de cesio comercial (cf. (2.2.5]) que generan intervalos de tiempo, basadas en la definición del segundo SI. Las lecturas se refieren a relojes fijos al nivel del mar. TAI se calcula como promedio pesado de los relojes individuales fijos insignificante. Las diferencias entre TAI y las escalas de tiempo de los laboratorios participantes se distribuyen mensualmente en la circular T la BIPM sección de tiempo.

La época TAI coincide con la época de UTI el 1 de enero de 1958. Debido a la desaceleración de la rotación de la tierra, la diferencia entre las escalas de tiempo está aumentando. La diferencia, para algunos fechas nos da, cantidades de:

TAI - UTI = + 6.^s 1 el 1 de enero de 1968
= + 16.^s 4 el 1 de enero de 1978
= + 23.^s 6 el 1 de enero de 1988
= + 24.^s 7 el 1 de enero de 1990
= + 26.^s 1 el 1 de enero de 1992.

El tamaño grande de las diferencias se deben al hecho que la unidad del segundo-SI se adoptó de la longitud del segundo del efemérides; y el segundo del efemérides se derivó de la duración media del día solar entre 1756 y 1895, cuando la rotación de la tierra era más rápida que hoy.

El segundo SI fue introducido formalmente como la unidad de tiempo fundamental en la escala TDT junto con la introducción de la escala de tiempo dinámica TDT, el 1 de enero de 1984. Esto es por qué existe una diferencia constante entre la escala TAI de tiempo, y la escala de tiempo

TDT (o ET)

$$TDT = ET = TAI + 32.5 \text{ s } 1984. \quad (2.51)$$

Consecuentemente hay solamente diferencia conceptual no práctico, entre las dos escala de tiempo, solamente consideramos los constante gravitacional como invariable.

Para muchas aplicaciones, en particular navegación, se requiere una escala de tiempo que proporcione ambas cosas una unidad de tiempo altamente uniforme y " la mejor adaptación posible al UTI y por lo tanto a la rotación de tierra. Esto es por qué, en 1972, fue introducida la escala de tiempo mediadora Universal.

El (UTC), y el TAI difieren por un número Entero n de segundos

$$UTC = TAI - n. \text{ (1s)} \quad (2.52)$$

dependiendo de la situación que prevalece. n puede cambiarse en fechas diferentes digamos el 1 de enero y/o el 1 de julio. Entonces la época de UTC es adaptada a la UTI insertando o removiendo intervalos de saltos. La unidad de UTC pertenece al segundo de SI.

La diferencia, DUTI, entre ambos tiempos no deben exceder 0.7 segundos

$$UTC - UTI = DUTI \leq 0.7s \quad (2.53)$$

DUTI es distribuido a través de los boletines del IERS, y debe tomarse en cuenta con todos los cálculos relacionados al sistema de referencia fijo a la tierra. En la mayoría de los países las señales de tiempo diseminadas se refieren a UTC. Esto también es verdad para las señales de tiempo en las efemérides pronosticadas de los satélites TRÁNSIT [6.3].

El Sistema del Posicionamiento Global (GPS) usa su propia escala de tiempo en particular tiempo de GPS. Difiere de UTC por un número casi entero de segundos. Ambas escalas de tiempo tenían épocas idénticas el 5 de enero de 1980. A causa que el tiempo de GPS no es incrementado por saltos de segundos la diferencia entre UTC y tiempo de GPS está aumentando. La unidad de tiempo de GPS es el SI segundo, Sin embargo, el tiempo de GPS se deriva de relojes los que forman parte del sistema de control GPS . Es por lo tanto una escala de tiempo solamente y puede mostrar ligeras diferencias cuando se compara al TAI. La relación entre UTC y tiempo de GPS se incluye en el boletín del tiempo del USNO y el BIPM, y también es diseminado dentro del " mensaje satélite GPS " [7.1.3]. En 1991 la diferencia fue aproximadamente

$$\text{GPS tiempo- UTC}_{1991} = 7s, \quad (2.54)$$

y se convirtió aproximadamente 8 segundos el 1 de julio de 1992. La relación exacta es (por ejemplo BIPM 1990)

$$\text{GPS tiempo} - \text{UTC} = n \text{ s} - C_o$$

n es un número entero, y el término de corrección C_o fue por ejemplo

$$\text{Ene, 1, 1989 } C_o = -1376ns$$

Ene, 1, 1989 Co = -1115ns
 Ene, 1, 1990 Co = -505ns
 Ene, 1, 1990 Co = -320ns
 Ene, 1, 1991 Co = +129ns
 Ene, 1, 1992 Co = +232ns

Ambos, UTC y el tiempo GPS son conceptualmente escalas de tiempo atómicas. En Fig. 2.11 una apreciación global es dada para todas las escalas de tiempo de interés en geodesia por satélite.

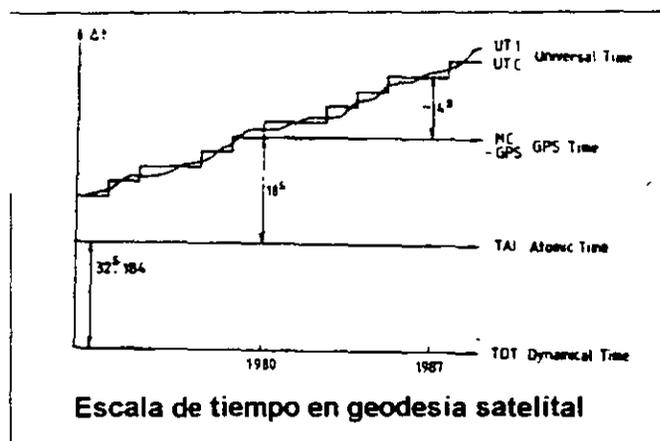


Fig. 2.11

2.2.5 Estándares de frecuencia y relojes.

En la geodesia satelital se requiere información precisa de tiempo y frecuencia. En muchos casos es necesario relacionar las épocas de algunos eventos los cuales se observan en las diferentes estaciones, separadas por distancias largas, con una exactitud de ± 1 microsegundos. El desempeño de las normas de frecuencia debe alcanzar una estabilidad de 1×10^{-15} sobre varias horas. Estas altas demandas pueden solamente cumplirse con los relojes atómicos.

El componente más importante de un reloj es su sistema oscilatorio (el oscilador). El movimiento periódico de este sistema tiene que ser generado mantenido y leído por medios adecuados. En relojes modernos, o sea. en los relojes atómicos, la conversión de los ciclos del oscilador a la escala unitaria "un segundo" se realiza por medio de contadores electrónicos o divisores.

Para: un reloj ideal CI, la relación entre el periodo del ciclo T_I y la frecuencia f_I se define como:

$$T_I = \frac{1}{f_I} \quad (2.55)$$

Contando N_I ciclos sobre un intervalo de tiempo dado $(t - t_0)$ nos da la escala de tiempo ideal.

$$(t - t_0) = N_I T_I = N_I / f_I \quad (2.56)$$

Aquí N_I se iguala a la integral

$$NI = \int_0^t f_i dt = f_i(t - t_0), \quad (2.57)$$

En la cual el número total de ciclos es N y la época inicial t_0 . Para un reloj atómico, Ci el cual existe en realidad como cualquier otro reloj, la frecuencia no es estrictamente constante. El comportamiento de la frecuencia se describe normalmente cómo (por ejemplo Tumbé 1980 Wübbenau 1991)

$$f_i(t) = f_i + \Delta f_i + f_i'(t - t_0) + f_i''(t) \quad (2.58)$$

En donde los terminos,

Δf_i sesgamiento de la frecuencia (constante del oscilador Ci)

f_i' deriva de la frecuencia

el f_i'' error aleatorio de la frecuencia.

Contando las oscilaciones de este reloj real los rendimientos de Ci

$$Ni = \int_0^t f_i(t) dt = f_i(t - t_0) + \Delta f_i(t - t_0) + \frac{f_i'(t - t_0)^2}{2} + \int_0^t f_i''(t) dt. \quad (2.59)$$

La época relacionada es

$$(t_i - t_0) = N_i T_i(t - t_0) + \frac{\Delta f_i}{f_i}(t - t_0) + \frac{f_i'}{2f_i}(t - t_0)^2 + \int_0^t \frac{f_i''(t)}{f_i} dt \quad (2.60)$$

Cuando

$$\Delta f_i(t_0) = N_0 T_i \quad (2.61)$$

es el error de sincronización en la primera época t_0 obtenida para una época más tarde t obtenemos del tiempo el error total del reloj Ci como:

$$\Delta t_i(t) = t_i - t = \Delta t_i(t_0) + \frac{\Delta f_i}{f_i}(t - t_0) + \frac{f_i'}{2f_i}(t - t_0)^2 + \int_0^t \frac{f_i''(t)}{f_i} dt \quad (2.62)$$

Después de renombrar. las expresiones, en (2.62) obtenemos una descripción frecuentemente-usada del error de tiempo $\Delta t_i(t)$

$$\Delta t_i = T_i(t_0) + R_i(t - t_0) + \frac{D_i}{2}(t - t_0)^2 + \int_0^t y(t) dt. \quad (2.63)$$

con

Ti(to) el prejuicio de tiempo constante

Ri cronometran la tendencia

Di el término cuadrático (la proporción de la tendencia, viejo)

el y(t) el azar el error de frecuencia relativo.

Para un reloj en particular los primeros tres términos tienen que ser estimados. Por consiguiente el error de tiempo del reloj depende en la incertidumbre de la estimación, y en la integral del error aleatorio de frecuencia desde la época inicial a la época de estimación. La estimación particular puede obtenerse a través de comparación con otros relojes., Esto es por qué los laboratorios y las estaciones de observación fundamentales pueden operar varios relojes atómicos los cuales son comparados entre ellos o con otros relojes de otras instituciones en una base regular,

Los errores relativos de frecuencia muestran un comportamiento típico para diferentes tipos de relojes atómicos. Estos errores pueden ser caracterizados ya sea en el dominio de tiempo o en el dominio de la frecuencia. Una medida adecuada para errores relativos de frecuencia en el dominio de tiempo es la llamada varianza de Allan. Para un tratamiento más profundo de la materia vea la literatura especial (por ejemplo Luck 1983, Guinot 1989b, PTTI, anualmente). Debe ser notado que, a causa de requerimientos de extremadamente exactitud alta en algunas partes de geodesia satelital el comportamiento de relojes en las estaciones de observación fundamental y en los satélites debe ser estudiada cuidadosamente. Esto es particularmente cierto para los relojes en los satélites GPS (7.1.2). El comportamiento de la frecuencia típica de relojes atómicos es demostrada en la Fig. 2.12.

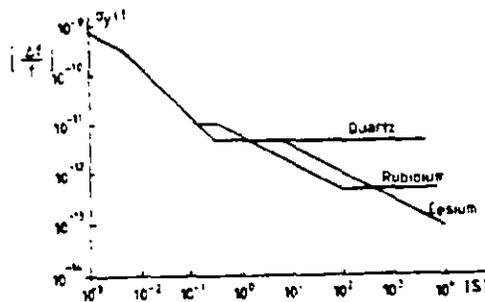


fig 2.12 Estabilidad de frecuencias típica

Fig. 2.12: la Estabilidad de estándares de frecuencia (la estabilidad a corto plazo o varias horas), cf. Remondi 1984

En la geodesia satelital las siguientes clases de osciladores son utilizados:

- oscilador de cristal de cuarzo de precisión
- rubidium estándar
- cesio estándar
- la masa de hidrógeno.

Los osciladores de cristal de Cuarzo de precisión son completamente suficientes como generadores de tiempo en receptores satelitales cuando son controlados por las señales de tiempo y frecuencia de los satélites. Éste es el caso con los satélites de GPS y TRÁNSIT. Los rasgos característicos de los osciladores de cuarzo son que ellos son algo sensibles a las variaciones de temperatura y ellos son afectados por un proceso de envejecimiento bastante fuerte. En la práctica es de importancia que los cuarzo corran en las condiciones de temperatura estables y sin interrupciones u otras perturbaciones.

El rasgo característico de la frecuencia estándar de rubidium es su excelente estabilidad largos periodos. Un rubidium estándar puede usarse como un oscilador externo para observaciones de GPS y cubrimientos del TRÁNSIT y, en particular para puentear periodo insuficiente satélite.

La frecuencia estándar de cesio, a causa a su alto, corto - y largo periodo de estabilidad a largo plazo, puede ser considerado como los relojes atómicos "por excelencia". Ensamblados en grupos, ellos forman el centro de laboratorios de tiempo, y ellos también pueden estar presentes en estaciones fundamentales de observación satelital, en estaciones de rastreo central de la órbita, o a sistemas de medición. La base de tiempo en los satélites GPS es a través del cesio y rubidium estándar.

Los cesio estándar ahora son transportable, y comercialmente disponible. Los masas de hidrógeno son necesarios para reunir la exactitud más alta exige, tales como aquellos requeridos por Interferometría de bases Muy Largas (VLBI) (10.2). UNA estabilidad de frecuencia el $\alpha(\Delta f/f)$ de 10^{-5} es referida sobre un periodo de tiempo de 10^2 o 10^5 los segundos masas de Hidrógeno son muy sensibles, y a la fecha tienen solamente condiciones operacionales bajo laboratorio.

2.3. Propagación de la Señal

Las señales, en su camino entre los satélites y las estaciones de tierra, se propagan en regiones atmosféricas de diversa naturaleza y en estado variable, y experimentan así diversas clases de influencias. Las variaciones pueden ocurrir tanto en la dirección de la propagación como en la velocidad de la propagación y en la fuerza de la señal. Para el usuario que está interesado en la señal imperturbada la atmósfera aparece como perturbación indeseada. Los impactos en los resultados de observación son, en muchos casos, mucho más grandes que la exactitud requerida en geodesia satelital. Por lo tanto, las influencias atmosféricas tienen que ser determinadas directamente por mediciones y/o modelando, y tienen que ser considerados dentro del proceso de ajuste.

Por otra parte, la información sobre el estado de la atmósfera superior puede ser obtenida cuando las señales recibidas de los satélites se comparan con las señales que serían observadas bajo condiciones atmosféricas libres (e.g. Lohmar 1985, Coco 1991, Wanninger 1992). Este último aspecto, sin embargo, no se discute aquí.

En este capítulo se dan algunos elementos fundamentales de la propagación de las ondas [2.3.1], [2.3.2], y las características de la propagación de la señal a través de la troposfera y la ionosfera son presentadas [2.3.3]. Para un tratamiento completo del tema vea la literatura especial (e.g. Kertz 1971, Maral, Bousquet 1986, Davies 1990, DeMunck, Spoelstra 1992).

Las formulas explicitas de la correccion para una tecnica determinada de la observacion como e.g. de Doppler, GPS y SLR se dan en los capitulos relevantes ([6.5.2], [7,4,4], [8,4,1]).

2.3.1 Algunos fundamentos de la propagación de las ondas

2.3.1.1 Relaciones y definiciones basicas

La relacion entre la longitud de onda, λ , la frecuencia, f , y la velocidad de la propagacion, v , es

$$v = \lambda * f \text{ (ec.2.64)}$$

Aqui λ , tiene unidades en metros (m), f tiene unidades de Hertz (Hz, oscilaciones por segundo), y v unidades de metros por segundo. En el contexto de los metodos de observacion en geodesia satelital solamente se consideran ondas electromagneticas. En metrologia electromagnetica las ondas se pueden mirar como disturbios del campo electromagnetico en el tiempo y el espacio (Wells 1974). Para una onda periodica el disturbio se repite en un punto fijo despues de un lapso del tiempo conocido como el periodo, P , y/o en un rato fijo despues de la adiccion de una distancia conocida como la longitud de onda, λ . La relación entre la frecuencia y el periodo es

$$f = \frac{1}{P} \quad (2.65)$$

La fase, ϕ de una onda periódica es la parte fraccionaria t/T del periodo P , con a el cual el tiempo t ha avanzado con respecto a un origen arbitrario del tiempo t_0 Además

$$\omega = 2\pi f \quad \text{la frecuencia angular} \quad (2,66)$$

y

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{la fase constante o numero de la onda.}$$

Sigue para la velocidad de la propagacion v

$$v = \lambda * f = \frac{\lambda}{P} = \frac{\omega}{k} \quad (2,67)$$

la onda periódica que puede ser modelada por una función sinusoidal en espacio y el tiempo es una *onda sinusoidal*. Por lo cual solamente las ondas que son funciones periódicas en el tiempo se consideran

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{P} + \Phi_0 \right) \quad (2,68)$$

donde y es la magnitud del disturbio en el tiempo t ; Φ_0 es la fase de la onda en $t = 0$, y A es la magnitud maxima o la *amplitud* de la onda. La fase en el tiempo t entonces t

$$\Phi = \frac{t}{P} + \Phi_0$$

$2\pi\Phi$ se llama *angulo de la fase* φ .

Con (2,66) seguida de (2,68)

$$y=A \sin(\omega t+\varphi_0) \quad (2,69)$$

La fig. 2,13 muestra la interpretacion geometrica de la ecuación (2,69) (cf. *Kahmen* 1978).

Fig. 2,13. Representacion de la propagacion de la onda

Si substituimos el numero de los ciclos N en la ecuación (2,56) por la fase total Φ referido una cierta epoca que comienza t_0 , obtenemos la relacion entre el tiempo, la fase, y la frecuencia

$$t = \frac{\Phi}{f} \quad (2,70)$$

La ecuación (2,70) es identica a (2,65), y puede ser considerada como la ecuación de un reloj. Da la relacion fundamental entre la fase de un proceso periodico y de la lectura correspondiente del tiempo en el reloj. La ecuación (2,70) es esencial para uerivar la ecuación de la observacion de las medidas de la fase del GPS (ver. [7,3,1,2]).

Las longitudes de onda de las ondas electromagneticas, y por lo tanto de la velocidad de la propagacion, dependen de ciertas caracteristicas del medio en el cual las ondas se propagan. En un vacio la velocidad es

$$c = \frac{\lambda_{vac}}{P} = f\lambda_{vac} = \frac{\omega}{k_{vac}} \quad (2,71)$$

El valor numerico c para la velocidad de propagacion en vacio es adoptado por las comunidades cientificas internacionales. El valor en use en geodesia satelital es (Melbourne et. al. 1983, McCarthy 1989)

$$c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (2,72)$$

Para los medios de propagación con excepción del vacío la velocidad de propagación es caracterizada por el índice de refracción n

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{vac}}{\lambda} = \frac{k}{k_{vac}} \quad (273)$$

En vez de n , el cual está cerca a 1, la refractividad

$$N = (n - 1) * 10^6 \quad (274)$$

es preferida.

La determinación apropiada de la refractividad N a lo largo de la propagación de la señal es esencial en geodesia satelital por los tiempos de recorrido de las señales electromagnéticas, o de diferencias de fase entre diversas ondas electromagnéticas, son medidas, y se escalan en las distancias (medidas en metros) con la velocidad adoptada o modelada de la propagación.

2.3.1.2 *Dispersion, velocidad de fase y velocidad de grupo*

Un medio en el cual la velocidad de la propagación de ondas electromagnéticas depende de la frecuencia es un medio dispersivo. En tal medio la refractividad depende de la frecuencia o de la longitud de onda. El efecto de la dispersión es causado por interacciones electromagnéticas entre el campo eléctricamente cargado del medio y el campo externo de la onda penetrante. Cuando la frecuencia atómica del medio y la frecuencia de la onda penetrante son muy cercanas la resonancia ocurre lo que genera una influencia dependiente de la frecuencia en la velocidad de la propagación (véase e.g. Wells 1974, Davies 1990, Brunner 1992).

La expresión

$$\frac{dv}{d\lambda} \text{ se llama dispersión de la velocidad.} \quad (275)$$

En un medio con la dispersión de la velocidad observamos diversas velocidades de propagación para las ondas sinusoidales (fases) y los grupos de ondas.

Debemos distinguir:

- la velocidad de propagación de la fase de una onda determinada con la longitud de onda uniforme (v_p velocidad de la fase)
- velocidad de propagación de un grupo de las ondas, generada por una superposición de diversas ondas de diversas frecuencias (v_g velocidad de grupo).

La relación entre la velocidad del grupo y la velocidad de la fase fue descrita inicialmente por Rayleigh (1881) como

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda} \quad (2.76)$$

para la derivación de (2.76) vea los libros de textos de Física o e.g. Wells (1974). Las relaciones correspondientes son válidas para el índice de la refracción

$$n_g = n_p - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (2.77)$$

La velocidad del grupo caracteriza la velocidad en la cual se propaga la energía, o la información. Después de la teoría de Fourier tal señal se puede ver como una superposición de muchas ondas periódicas determinadas con diversas frecuencias las cuales experimentan una dispersión diferente.

En geodesia satelital aplicada tenemos que probar cuidadosamente para una observación determinada si tiene que ser aplicada la velocidad de grupo o la velocidad de la fase. En tecnología GPS, por ejemplo, la propagación de las señales del código es afectada por la velocidad del grupo v_g , y la propagación de las fases portadoras por la velocidad de la fase v_p . La ionosfera es un medio dispersivo para las microondas, pero la troposfera no lo es. Para las frecuencias en el dominio óptico, se sostiene lo contrario. La velocidad de la fase, en un medio dispersivo, puede exceder la velocidad del vacío c . La velocidad del grupo, sin embargo, no puede, de acuerdo con la teoría de la relatividad. En medios no dispersivos $v_g = v_p$.

2.3.1.3 Dominios de la frecuencia

El espectro de la frecuencia de ondas electromagnéticas contiene cerca de 20 tipos de magnitudes (fig. 2.14). En geodesia satelital solamente se utilizan dos dominios pequeños, a saber,

Fig. 2,14: Espectro de ondas electromagnéticas la luz visible

la llamada luz visible (0.4... 0.8 10⁶ Hz) y el dominio de las microondas (10⁹... 10¹⁰ Hz). Algunos prefijos y simbolos que se utilizan comtznmente para la descripcion de frecuencias se explican en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Prefijos, simbolos y ordenes de magnitud

Pico	p	10 ⁻¹²
nano	n	10 ⁻⁹
micro	p.	10 ⁻⁶
Milli	m	10 ⁻³
centi	c	10 ⁻²
Hecto	H	10 ²
Kilo	K	10 ³
Mega	M	10 ⁶
Giga	G	10 ⁹
Tera	T	10 ¹²
Peta	p	10 ¹⁵

Tabla 2.3 Bandas de frecuencias

Long. De onda λ	frecuencia f	
LF	> 1000 m	<300 KHz
MF	100... 1000 m	300... 3000 KHz
HF	10... 100 m	3... 30 MHz
VHF	1... 10 m	30... 300 MHz
UHF	10 cm... 1 m	300... 3000 MHz
SHF	1 cm 10 cm	3 GHz... 30 GHz
EHF	1 mm... 1 cm	30... 300 GHz

Tabla 2.4 Bandas de radar

denominación	frecuencia	long. de onda media
P-band	220... 300 MHz	115 cm
L-band	1... 2 GHz	20 cm
S-band	2... 4 GHz	10 cm
C-band	4... 8 GHz	5 cm
X-band	812.5 GHz	3 cm
Ku-band	12.5... 18 GHz	2 cm
K-band	18... 26.5 GHz	1.35 cm
Ka-band	26.5... 40 GHz	1 cm

Se utilizan diferentes clases de subdivisiones y de terminologia para las ondas electromagnéticas. En la tecnologia de la infol-nacion se acostumbra una subdivision en bandas de frecuencia (Cuadro 2.3) en geodesia satelital tambien es utilizada la subdivision en las bandas del radar (Cuadro 2,4). Las asignaciones determinadas a las mayusculas fueron generadas al azar durante la Segunda Guerra Mundial.

INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS.

3.1. INTRODUCCIÓN.

El Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global) fue creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) para constituir un sistema de navegación preciso con fines militares que sustituyeran al antiguo sistema utilizado, que no era otro que las mediciones Doppler sobre la constelación Transit.

Para ello, aprovecharon las condiciones de la propagación de las ondas de radio de la banda L en el espacio, así como la posibilidad de modular las ondas para que en ellas se pueda incluir la información necesaria que permita posicionar un objeto en el sistema de referencia apropiado.

Este proyecto se hizo realidad entre los meses de febrero y diciembre de 1978, cuando se lanzaron los cuatro primeros satélites de la constelación NAVSTAR, que hacían posible el sistema que resolvería la incógnita de nuestra posición en la Tierra.

A continuación vamos a describir las generalidades del sistema GPS y sus características más importantes. Para ello, debemos dividir el sistema en tres sectores fundamentales y dependientes entre sí, el *sector espacial*, el *sector de control* y el *sector de usuarios*.

3.1.2.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

EL SECTOR ESPACIAL.

Este sector lo forman los satélites de la constelación NAVSTAR (Navegación por satélite en tiempo y distancia). La constelación está formada por seis planos orbitales, y en cada uno de ellos existe una órbita elíptica casi circular donde se alojan los satélites regularmente distribuidos. Los planos tienen una inclinación de 55° respecto al plano del ecuador, y se nombran como A, B, C, D, E y F. Cada órbita contiene al menos cuatro satélites, aunque pueden contener más. Los satélites se sitúan a una distancia de 20200 Km respecto del geocentro, y completan una órbita en doce horas sidéreas. Estos satélites son puestos en funcionamiento por el Comando de las Fuerzas Aéreas Espaciales de U.S.A (AFSPC).

Con estos fundamentos, se garantiza la presencia de al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todos los lugares de la superficie de la Tierra.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES.

Los satélites de la constelación NAVSTAR son identificados de diversos modos:

- Por su número NAVSTAR (SVN).
- Por su código de ruido pseudoaleatorio (PRN). En los códigos de transmisión existen características de ruido pseudoaleatorio traducidas en bits que identifican a cada satélite de la constelación.

- Por su número orbital. Un ejemplo sería el satélite 3D, que corresponde al satélite número tres del plano orbital D.

En la actualidad, a fecha Enero-98, existe un número de veintisiete satélites operativos, pertenecientes a los bloques IIA y IIR. Se disponen:

- Cinco en los planos A, E y F.
- Cuatro en los planos B, C y D.

Todos disponen de osciladores atómicos de cesio, salvo los SVN 24, 27 y 31 que lo tienen de rubidio. En el caso de los primeros la precisión es de 10-13s, mientras que los de rubidio es de 10-12s. La frecuencia fundamental de emisión de estos osciladores es de 10.23 MHz. El tiempo utilizado por el sistema GPS es un tiempo universal coordinado denominado UTC(USNO) que define el Observatorio Naval de los Estados Unidos mediante relojes atómicos de hidrógeno. La unidad del tiempo GPS es el segundo atómico internacional y tiene su origen coincidente con el UTC a las cero horas del 6 de enero de 1980. Así mismo, debemos añadir que los satélites disponen además de:

- Antenas emisoras de ondas de radio (banda L). Con ellas transmiten la información al usuario.
- Antenas emisoras-receptoras de ondas de radio (banda S). Sirven para actualizar su situación a través del sector de control.
- Paneles solares para disponer de la energía necesaria para su funcionamiento.
- Reflectores láser para el seguimiento desde el sector de control.

La vida de los satélites oscila entre los seis y diez años, y es de reseñar que el más antiguo aun operativo tiene una edad de ocho años y medio. El más duradero fue el SVN-3 que duró trece años y medio.

SEÑAL DE LOS SATÉLITES.

Los satélites de la constelación NAVSTAR constan de un oscilador antes mencionado que genera una frecuencia fundamental ν_0 de 10,23 MHz. A partir de esta frecuencia fundamental se generan dos portadoras en la banda L de radiofrecuencia, denominadas L1 y L2.

Además, existen dos formas de código pseudoaleatorio que se modulan sobre estas portadoras, son los códigos C/A y P, además de un mensaje, que da la información de los parámetros orbitales del satélite y del estado del reloj. Los códigos son una secuencia de +1 y -1, correspondientes a los valores binarios de 0 y 1 respectivamente.

Los componentes de la señal y sus frecuencias son:

COMPONENTE		FRECUENCIA(MHz)
<i>Frecuencia Fundamental</i>	v_0	10.23
<i>Portadora L1 154</i>	$154 \cdot v_0$	1.575.42
<i>Portadora L2 120</i>	$120 \cdot v_0$	1.227.60
<i>Código P</i>	v_0	10.23
<i>Código C/A</i>	$v_0/10$	1.023
<i>Código W</i>	$v_0/20$	0.5115
<i>Mensaje de Navegación</i>	$v_0/204.600$	$50 \cdot 10^{-6}$

El código C/A (*clear/access*) se repite cada milisegundo, dando como resultado un código de 1023 chips, siendo la longitud aproximada de cada chip de unos 300 m. Este código está declarado de uso civil para todos los usuarios.

El código preciso P se compone de 2,3547·10¹⁴ bits y se repite aproximadamente cada 266,4 días. Este código lleva una palabra denominada HOW que indica en que momento del código está cuando el receptor empieza a recibirlo, de este modo el receptor engancha el código y empieza a medir. El código P es secreto y de uso militar. Se origina a partir de la combinación de dos secuencias de bits, generados a partir de dos registros. La longitud de cada chip es de 30 m. Con el fin de proteger el código P, éste se encripta usando un código W, dando lugar al código Y. Si el código W está en curso se habla de que está conectado el A/S (Anti-Spoofing).

El mensaje de navegación es mandado por los satélites, y consta esencialmente de información sobre el reloj de los satélites, parámetros orbitales (efemérides), estado de salud de los satélites y otros datos de corrección. El mensaje consta de 25 grupos de 1500 bits cada uno y divididos en cinco celdas. Cada grupo se transmite con una frecuencia de 50 Hz y tarda 30 s.

Esto supone que el mensaje modulado completo sobre ambas portadoras tiene una duración de 12 min. 30 s. Por razones de índole militar, se introduce un error intencionado en las efemérides radiodifundidas de los satélites, denominado Disponibilidad Selectiva (SA). Esto repercute en el posicionamiento sobre el sistema de referencia WGS84, ya que si la posición de los satélites que nos sirven de referencia está alterada nuestro posicionamiento no se va a realizar en dicho sistema, sino que se va a efectuar en un sistema arbitrario, con un error mayor o menor en función de la cantidad de SA que exista en ese instante. Este problema es importante en posicionamientos absolutos, ya que no podemos saber la posición correcta. Sin embargo, en posicionamientos diferenciales nos afecta en posición pero no en precisión, ya que la posición relativa de un punto respecto a una referencia (sus incrementos de coordenadas) no está afectada de este error.

EL SISTEMA DE REFERENCIA. DATUM WGS-84.

Las coordenadas, tanto de los satélites como de los usuarios que se posicionan con el sistema GPS, están referidas al sistema de referencia WGS84 (Sistema Geodésico Mundial de 1984). Estas coordenadas pueden ser cartesianas en el espacio respecto al centro de masas de la Tierra (X, Y, Z) o geodésicas (φ , λ , h). El sistema tiene las siguientes características:

- Origen en el Centro de Masas de la Tierra.

- El eje Z es paralelo al polo medio.
- El eje X es la intersección del meridiano de Greenwich y el plano del ecuador.
- El eje Y es perpendicular a los ejes Z y X, y coincidente con ellos en el Centro de Masas terrestre.
- Las coordenadas geodésicas están referidas a un elipsoide de revolución con las siguientes características:

- * Semieje mayor (a) : 6.378.137 m.
- * Inversa del aplastamiento ($1 / \alpha$) : 298,257223563
- Velocidad angular de rotación (ω) : $7.292.115 \cdot 10^{-11}$ rad / s.

La transformación de las coordenadas WGS84 a otro sistema de referencia, y viceversa, es posible con transformaciones tridimensionales de siete parámetros, ya sean calculadas (donde deberemos conocer al menos las coordenadas de tres puntos en ambos sistemas) o establecidas por algún organismo con una gran base de datos. Para realizar una transformación correcta debemos definir el elipsoide al que queremos referir nuestras coordenadas, la proyección y la zona. A modo de ejemplo, si queremos transformar puntos con coordenadas WGS84 a coordenadas en el Datum oficial español, deberemos especificar que se trata del elipsoide Internacional de Hayford, proyección UTM_ED50 y zona 28, 29, 30 ó 31 (según el huso donde se encuentren los puntos).

Existen otros tipos de transformaciones, como las bidimensionales, las de coordenadas planas y altura, y aquellas en que se introducen modelos del Geoide (globales o zonales) con el fin de obtener alturas ortométricas.

EL SECTOR DE CONTROL.

Este sector tiene como misión el seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR para los siguientes fines:

- Establecer la órbita de cada satélite, así como determinar el estado de sus osciladores.
- Hallados los parámetros anteriores, emitirlos a los satélites para que éstos puedan difundirlos a los usuarios.

De este modo, el usuario recibe la información de las efemérides de posición de los satélites y el error que se está produciendo en su reloj, todo ello incluido en el mensaje de navegación.

Las Estaciones de Control de la constelación son fundamentalmente:

- Colorado Springs (U.S.A.). Central de cálculo y operaciones.
- Ascensión (Atlántico Sur).
- Hawai (Pacífico Oriental).
- Kwajalein (Pacífico Occidental).
- Diego García (Indico).

Existen además otras estaciones de seguimiento (láser, radar y ópticas), cuyo fin es la obtención de efemérides que no estén afectadas por la disponibilidad selectiva, denominadas precisas, y que están al alcance del usuario a través de organismos científicos como el IGS (International Geodynamic Service) o el NGS (National Geodetic Survey). Con ellas, tenemos la seguridad de posicionarnos en el sistema WGS84 con los errores típicos del sistema.

EL SECTOR DE USUARIOS.

Este sector lo compone el instrumental que deben utilizar los usuarios para la recepción, lectura, tratamiento y configuración de las señales, con el fin de alcanzar los objetivos de su trabajo. Los elementos son el equipo de observación y el software de cálculo, que puede ser objeto de uso tras la campaña de observación, o bien realizable en tiempo real, donde se obtienen los resultados in situ.

Equipo de observación. Lo componen la antena, el sensor y la unidad de control o controlador.

- **La antena de recepción** tiene la misión de recibir las radiaciones electromagnéticas que emiten los satélites y transformarlas en impulsos eléctricos, los cuales conservan la información modulada en las portadoras. Se denomina centro radioeléctrico de la antena al punto que se posiciona en nuestra observación. Dado que éste no suele coincidir con el centro físico, es conveniente orientar todas las antenas de una misma observación en la misma dirección con el fin de que el error se elimine.

- **El sensor** recibe los impulsos de la antena receptora, y reconstruye e interpreta los componentes de la señal, es decir, las portadoras, los códigos y el mensaje de navegación. En definitiva, lo que hace es demodular la señal original.

El proceso es el siguiente, el sensor correla los códigos, es decir, lo compara con una réplica que él mismo genera, y de este modo halla el tiempo que ha tardado en llegar la señal al receptor, obteniendo la distancia al satélite multiplicando esa diferencia de tiempos por el valor de la velocidad de propagación de las ondas en el vacío (aproximadamente unos 300.000 Km/s).

Como estas distancias están afectadas de errores, se las denomina pseudodistancias.

Para obtener medidas de pseudodistancia mediante diferencia de fase de las portadoras, el sensor reconstruye éstas por modulación bifase-binaria de los códigos modulados en ellas.

Las técnicas de obtención de los *códigos* son, entre otras:

- **Correlación estrecha.** Se utiliza para reconstruir los códigos C/A y P, éste último cuando no está encriptado.

- **Correlación cruzada más cuadratura.** Esta técnica se utiliza para descryptar el código P cuando el A/S está activado. También recibe esta técnica el nombre de "P-code adied".

Se fundamenta en encontrar el código W que es el responsable de que P no esté disponible para

los usuarios.

- Z-TrackingTM

Es otra técnica para descifrar el código P. Para ello, utiliza dos filtros de paso bajo para reducir el nivel de ruido. Hasta el momento, es la técnica que menor degradación produce en la señal (18 dB) y mejores resultados proporciona.

Para reconstruir las *portadoras* se utiliza principalmente:

- **Cuadratura.** Consiste en elevar la onda al cuadrado, limpiando dicha onda de toda la información modulada en ella (códigos y mensaje). Este método tiene el inconveniente de que se produce un empeoramiento importante de la relación señal/ruido por el aumento de éste último, produciendo una degradación importante en la señal. Debemos añadir que toda señal recibida con una relación señal/ruido menor de 30 no debe ser considerada como útil en nuestros trabajos.

- **Reconstrucción a partir de los códigos.** Si por algunas de las técnicas anteriores hemos conseguido acceder a los códigos, podemos reconstruir las fases de las portadoras donde están modulados. La portadora L1 se puede reconstruir a través del código C/A y del código P, mientras que la L2 sólo a través del código P, ya que no contiene el C/A.

El sensor tiene unos canales de recepción, de doble señal si es un receptor bifrecuencia y de señal única si es monofrecuencia. Cada canal recibe las señales de un satélite diferente, y dependiendo del número de canales obtendremos mayor o menor información en un momento dado. Los receptores disponen de un reloj u oscilador que sincroniza los tiempos de recepción. Estos relojes suelen ser de cuarzo con una alta estabilidad, dando precisiones de 10⁻⁷s. Con ellos se obtiene el desfase respecto al tiempo GPS. Este aspecto es el que supone el añadir una incógnita en el cálculo posterior, que no es otra que el estado del reloj en cada época de grabación.

Es muy frecuente encontrar equipos de observación en los cuales el sensor y la antena forman un elemento único, lo que facilita el paso de información y agiliza el proceso, evitando los retardos que se producen en la transmisión por cable.

- **El controlador** realiza las siguientes tareas:

- * Controlar el sensor.
- * Gestionar la observación.
- Almacenar los datos.

En definitiva, con él vamos a marcar las pautas y modos de trabajo que consideremos oportunos en cada caso. Entre estas pautas destacan:

- * Tipo de observación (estática, stop & go, cinemática, etc.).
- * Parámetros de la observación (máscara de elevación, modo de grabación, determinación de las épocas, datos meteorológicos, etc.).

- * Estado y salud de los satélites.
- * Seguimiento de los mismos y calidad de la señal que transmiten.
- * Filtrado de observaciones y datos.
- * Definición y atributos de los puntos de observación.
- * Estados de aviso en conceptos de geometría y pérdidas de ciclo.
- * Definición del sistema de referencia.
- * Tiempos de observación y actualización de tiempos.
- * Control del nivel energético.
- * Posición inicial y secuencial.

El buen manejo del controlador es fundamental en los procesos de observación, así como el conocimiento y aplicación de los parámetros adecuados en cada situación o necesidad. Los datos suelen ser grabados en unidades independientes de memoria o tarjetas RAM PCMCIA, que varían desde los 512 Kbytes a los 4 Mbytes de capacidad. También pueden ser almacenados directamente en un PC portátil conectado al receptor. Es muy importante controlar la capacidad de grabación de datos y el tiempo de observación marcado. Estos son algunos ejemplos de almacenamiento por tiempo de observación en función del número de satélites y señales recibidas:

	0,5 Mb	1 Mb	2 Mb	4 Mb
6 satélites sobre L1 y L2 con épocas de 2 s.	1h	2h	4h	8h
6 satélites sobre L1 y L2 con épocas de 5 s.	2,4h	4.8h	9,6h	19.2h
6 satélites sobre L1 y L2 con épocas de 15 s.	7,2h	14,4h	28,8h	57,6h

Tras la observación se obtienen los siguientes datos:

- * Mensaje de navegación.
- * Efemérides radiodifundidas por los satélites.
- * Datos meteorológicos.
- * Almanaque de estado de los satélites.
- * Fichero de observación.

Estos datos pueden ser volcados en un ordenador para ser tratados con un software de post-proceso, o bien tratados "in situ" por el mismo controlador si éste dispone de un software de proceso y así obtener los resultados en tiempo real.

El usuario debe saber que los datos citados anteriormente pueden ser transformados a un formato estándar independiente en modo ASCII para insertarlos y ser tratados por cualquier software de proceso de datos GPS. Este formato es el denominado RINEX, que en la actualidad ya figura como RINEX-2, con la posibilidad de incluir observaciones realizadas a través de la constelación GLONASS.

Tipos de receptores.

Fundamentalmente existen:

- *Navegación*. Reciben únicamente observables de código (tiempos). Son los instrumentos menos precisos, aunque su evolución está siendo espectacular. Sus aplicaciones más comunes son la navegación, catastro, GIS y levantamientos de escalas menores de 1/ 5000 en los más sofisticados.

- *Monofrecuencia*. Reciben las observables de código y fase de la portadora L1. La precisión de estos instrumentos ya es significativa, y son de aplicación topográfica y geodésica en pequeñas distancias (hasta 100 km).

- *Bifrecuencia*. Reciben las observables de código y fase de las portadoras L1 y L2. La precisión y el rendimiento son mucho mayores debido a la posibilidad de combinar los datos y formar en post-proceso combinaciones de observables que agilizan el cálculo y eliminan los errores de retardo atmosférico. Están indicados para trabajos de precisión y allí donde el rendimiento y los buenos resultados requeridos sean máximos.

3.2.- LAS OBSERVABLES.

INTRODUCCIÓN.

Las observables del posicionamiento por satélite son fundamentalmente dos:

- **Observables de tiempo:**

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

- **Observables de diferencia de fase de la portadora:**

- * Diferencia de fase de la portadora L1, denominado $\Phi 1$.
- * Diferencia de fase de la portadora L2, denominado $\Phi 2$

A partir de estas observables podemos calcular la distancia satélite-receptor, mediante la comparación entre la señal que envía el satélite y la que genera el receptor. Pero estas distancias están afectadas por una serie de errores, por consiguiente se denominan pseudodistancias.

Además con estas observables se pueden formar diferentes combinaciones como las que mencionaremos más adelante.

2. MEDIDAS DE CÓDIGO.

Llamamos t_S al tiempo que marca el reloj del satélite cuando emite la señal y t_R al tiempo que marca el reloj del receptor cuando la recibe. Análogamente, los desfases o errores de los relojes con respecto a las Escalas de Tiempo serán δ_s y δ_R . El valor del tiempo de emisión (t_s), es transmitido en el código que envía el satélite. La diferencia entre ambas lecturas de tiempo (Δt) es el tiempo que ha tardado la señal en llegar al receptor:

$$\Delta t = t_R - t^S = (t_R - \delta_R) - (t^S - \delta^S) = (t_R - t^S) + (\delta^S - \delta_R) = \Delta t + \Delta \delta$$

donde $\Delta t = t_R - t^S$ y $\Delta \delta = \delta^S - \delta_R$.

El error del satélite δ^S lo podemos modelar por medio de un polinomio con los coeficientes que son transmitidos del mensaje de navegación. Por lo tanto, suponiendo conocido el valor de δ^S y aplicada esta corrección al valor de t^S , el valor de $\Delta \delta$ será únicamente el valor de $-\delta_R$. El intervalo de tiempo Δt multiplicado por la velocidad a la que viaja la onda, es decir la velocidad de la luz, c , nos da lugar a la medida de pseudodistancia:

$$R = c \cdot \Delta t = c \cdot \Delta t(\text{GPS}) + c \cdot \Delta \delta = \rho + c \cdot \Delta \delta$$

La distancia ρ es la distancia real existente entre el satélite en la época t^S y el receptor en la época t_R .

La precisión de la pseudodistancia derivada de las medidas de código se evalúa normalmente en un 1% la longitud del chip del código. Sin embargo, recientes desarrollos demuestran que es posible llegar a obtener precisiones de 0,1% la longitud del chip del código.

3. MEDIDAS DE FASE.

La ecuación de fase para ondas electromagnéticas observada por un receptor es:

$$\varphi = \int_{t_0}^t f \cdot dt$$

Asumiendo que la frecuencia se mantiene constante, en el instante inicial se cumple que $\varphi(t_0)=0$, y teniendo en cuenta el tiempo t_p , necesario para que la señal recorra la distancia geométrica ρ entre el satélite y el receptor, la ecuación de fase queda:

$$t_p = \frac{\rho}{c}$$

$$\varphi = f \int_{t_0}^t dt = f \cdot (t - t_p) \quad \text{siendo:}$$

y sustituyendo en la expresión anterior, tendremos : $\varphi = f \cdot (t - \frac{\rho}{c})$

Llamamos $\varphi^S(t)$ a la fase de la portadora recibida por el receptor con una frecuencia f^S Y $\varphi^R(t)$ a la fase de una portadora de referencia generada en el receptor con frecuencia f^R . El parámetro t es una época en la escala de Tiempo del sistema. Para la época inicial (comienzo de la observación), se supone que $t_0 = 0$. A partir de la ecuación de fase anterior se obtiene:

$$\varphi^S(t) = f^S t - f^S \frac{\rho}{c} - \varphi^S_0$$

$$\varphi^R(t) = f^R t - \varphi^R_0$$

Las fases iniciales φ^S_0 y φ^R_0 son causadas por los errores de los relojes del satélite y receptor:

$$\begin{aligned}\varphi^S_0 &= f^S \cdot \delta^S \\ \varphi^R_0 &= f^R \cdot \delta^R\end{aligned}$$

La diferencia de fase entre ambas será:

$$\varphi^S_R(t) = \varphi^S(t) - \varphi^R(t) = -f^S \frac{\rho}{c} - f^S \cdot \delta^S + f^R \cdot \delta^R + (f^S - f^R) \cdot t$$

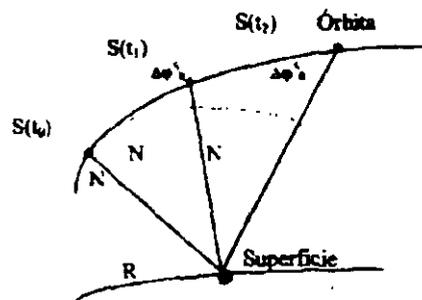
El satélite genera una onda en un instante y el receptor genera otra onda en ese mismo instante y compara, por lo tanto el receptor debe generar una onda de la misma frecuencia a la del satélite para poderlas comparar y medir la diferencia de fase entre ambas, por ello la diferencia de fase es:

$$\begin{aligned}f^S &= f^R = f \\ \varphi^S_R(t) &= -f \frac{\rho}{c} - f \Delta\delta \\ \text{donde } \Delta\delta &= \delta^S - \delta^R\end{aligned}$$

Si comenzamos la medición en la época t_0 , empezamos a medir diferencias de fase, pero el valor inicial del n° entero de longitudes de onda (N) entre el satélite y el receptor no es conocido. Sin embargo, el valor de N (también llamada **ambigüedad**) es constante en el tiempo y después de un tiempo continuado de observación, la diferencia de fase para la época t será:

$$\varphi^S_R(t) = \Delta\varphi^S_R \int_{t_0}^t + N$$

donde $\Delta\varphi^S_R$ (medible) es la fracción de fase o lo que ha variado la fase desde t_0 a t . Una interpretación geométrica de esto es:



Se considera que el valor inicial de la diferencia de fase es cero $\Delta\varphi_0 = 0$. Operando y sustituyendo en las expresiones anteriores, y expresando de forma arbitraria el valor de $\Delta\varphi^S_R$

como $-\Phi$ (para evitar los signos (-) en la expresión), se obtiene la ecuación de medida de fase:

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} \Delta\delta + N$$

donde $\lambda = c / f$

Multiplicando toda la ecuación por la longitud de la onda λ , pasaremos de una medida de fase en ciclos a una medida de fase en unidades de longitud.

$$\Phi \cdot \lambda = \rho + c \cdot \Delta\delta + \lambda \cdot N$$

4. COMBINACIÓN DE OBSERVABLES.

Las combinaciones de observables que se puedan formar van a depender de la cantidad de observables que dispongamos, es decir, se podrán utilizar o no todas las observables dependiendo del tipo de receptor que se utilice (navegador, monofrecuencia, bifrecuencia, etc.).

Cuando disponemos sólo de medidas de código sobre las dos portadoras, es decir, P1 y P2, podemos formar una combinación lineal de ambos códigos que sea, por ejemplo la suma (P1+P2). Además se podrían formar otras combinaciones, de expresiones más complicadas, que tienen la ventaja de suavizar la señal y reducir el ruido.

Cuando disponemos sólo de medidas de código y fase sobre una portadora, es decir, C/A o P, y L1, podemos formar una combinación de medidas de código y fase sobre una portadora.

En este caso, el código se utilizará para obtener una solución aproximada del punto, mejor que la solución de navegación, y tomar ésta para calcular las coordenadas aproximadas del punto que se utilizarán en la ecuación de fase.

Cuando disponemos de medidas de código y fase sobre las dos portadoras, es decir, de todos los observables podemos formar una gran combinación de observables. Como en el caso anterior las medidas de código nos ayudarán a obtener una solución más aproximada del punto, para luego trabajar con las medidas de fase.

Una combinación lineal de fases sobre L1 y L2, en su expresión general, se puede definir como:

$$\varphi = n_1 \varphi_1 + n_2 \varphi_2$$

donde n_1 y n_2 son arbitrarios. Expresando el valor φ_1 como $f_1 t$, para las correspondientes frecuencias f_1 y f_2 , tenemos:

$$\varphi = n_1 f_1 t + n_2 f_2 t = f \cdot t$$

La frecuencia f será, $f = n_1 f_1 + n_2 f_2$, siendo $\lambda = c / f$, la longitud de la onda de la combinación lineal.

En el caso de señales GPS, se pueden formar unas combinaciones sencillas de las

portadoras L1 y L2, como son:

• **La banda estrecha (Ln):** $\Phi_{L1+L2} = \Phi_{L1} + \Phi_{L2}$

Los coeficientes n1 y n2 son la unidad
La longitud de onda es $\lambda_{L1+L2} = 10,7 \text{ cm}$

• **La banda ancha (Lw):** $\Phi_{L1-L2} = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}$

El coeficiente n1 = 1 y n2 = -1
La longitud de onda es $\lambda_{L1-L2} = 86,2 \text{ cm}$

Una ventaja que tienen estas dos combinaciones se produce a la hora del cálculo de las ambigüedades (N), ya que al pasar de las dos frecuencias L1 y L2 a una, ya sea la formando la banda ancha o la banda estrecha, el cálculo de las ambigüedades es más sencillo, ya que se reduce el espacio de búsqueda de las ambigüedades.

Una combinación lineal de fases que tiene unas características especiales e interesantes es la llamada "combinación libre de efecto ionosférico", o más comúnmente conocida como Φ_{L3} o L_c . Esta combinación se utiliza para eliminar en efecto ionosférico, y los coeficientes n1 y n2 con los que se cumple esta condición son :

$$n_1 = 1 \text{ elegido arbitrariamente}$$

$$n_2 = - \frac{f_{L2}}{f_{L1}}$$

Por lo tanto la expresión de Φ_{L3} será:

$$\Phi_{L3} = \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \Phi_{L2}$$

Esta combinación tiene la gran ventaja de eliminar el efecto que produce la Ionosfera sobre la señal que transmiten los satélites, pero por otro lado, con esta combinación el valor N de las ambigüedades pierde su naturaleza de número entero, luego no se podrá fijar el valor entero de las ambigüedades y se tendrá que trabajar con valores reales de ambigüedad.

La principal desventaja que tienen cualquiera de las combinaciones lineales de fases es que si asumimos cierto nivel de ruido en la medida de fases sobre las portadoras L1 y L2, entonces este nivel de ruido se incrementará para estas combinaciones. Este ruido se puede evaluar aplicando la ley de propagación de errores a partir del ruido de cada portadora.

3.3.-CALIDAD Y BONDAD DE LAS OBSERVACIONES.

INTRODUCCIÓN.

Al igual que cualquier observación de topografía clásica, una observación GPS o GLONASS está sometida a varias fuentes de error que se pueden minimizar o modelar según los equipos y metodología de observación que utilicemos. Un receptor determina las distancias que hay entre su antena y las antenas de los satélites desde los cuales está recibiendo su señal. Basándose en estas distancias y en el conocimiento de las posiciones de los satélites, el receptor puede

calcular su posición. Sin embargo, diversos errores afectan a la medida de la distancia y por consiguiente se propagan al cálculo de la posición del receptor.

Las medidas de código y las medidas de fase se ven afectadas por errores sistemáticos y por ruido aleatorio. La precisión en posicionamiento absoluto que un usuario puede alcanzar con un receptor depende principalmente de cómo sus sistemas de hardware y software puedan tener en cuenta los diversos errores que afectan a la medición. Estos errores pueden ser clasificados en tres grupos: los **errores relativos al satélite**, los **errores relativos a la propagación de la señal en el medio**, y los **errores relativos al receptor**.

ELEMENTO	FUENTE DE ERROR
Satélite	Errores en el oscilador Errores o variaciones en los parámetros orbitales
Propagación de la señal	Refracción ionosférica Refracción troposférica S/A. Disponibilidad Selectiva Pérdidas de ciclos Multipath. Ondas reflejadas
Receptor	Errores en el oscilador Error en las coordenadas del punto de referencia Error en el estacionamiento Error en la manipulación del equipo Variación y desfase del centro de la antena

Figura 1. Fuentes de error.

Algunos de estos errores sistemáticos pueden ser modelados e incluso eliminados utilizando combinaciones apropiadas de los observables a partir de una o dos frecuencias, o trabajando en modo diferencial, utilizando dos receptores.

En la medida de la calidad y bondad de una observación van a influir o contribuir dos términos: el **URE** y el **DOP**. El **URE** (User Range Error) es el error cometido en la medida de la pseudodistancia por el usuario. Este error contempla los errores al predecir las efemérides, inestabilidades en el vehículo espacial, relojes de los satélites, efectos ionosféricos y troposféricos, efecto multipath, ruido de la señal y para GPS, la Disponibilidad Selectiva (SA).

Todos estos errores en su conjunto se recogen en el valor σ_{URE} . El **DOP** o Dilución de la Precisión es la contribución puramente geométrica al error en el posicionamiento de un punto. Es un valor adimensional que da una idea de la solidez de la figura formada por el receptor y los satélites que tiene a la vista. Analizando estos factores de error en su conjunto, el error en el posicionamiento de un punto viene expresado por :

$$\text{error rms de posición} = \sigma_{URE} \cdot \text{DOP}$$

2. ERRORES RELATIVOS AL SATÉLITE.

ERROR DEL RELOJ DEL SATÉLITE.

Este error es el desfase que tiene el reloj del satélite respecto al Tiempo GPS o respecto al Tiempo GLONASS. Los satélites llevan relojes atómicos con osciladores de cesio o de rubidio, sin embargo ningún reloj, incluso el atómico es perfecto.

Los errores en los osciladores de los satélites pueden eliminarse mediante las correcciones enviadas en el mensaje de navegación que recibe el receptor, y que son calculadas y actualizadas por las estaciones de seguimiento. Para cada reloj de satélite se determina su desfase para una época inicial, y los coeficientes de la marcha o deriva del estado del reloj.

Estos parámetros se graban en el correspondiente satélite y se incluyen en el mensaje de navegación que manda el satélite. Pero aunque el receptor aplique las correcciones para el error del reloj del satélite, sigue permaneciendo un pequeño error residual estimado en unos 10 nanosegundos o menos, y que es debido a la imposibilidad de predecir exactamente la marcha del estado del reloj del satélite.

ERRORES EN LOS PARÁMETROS ORBITALES.

Para calcular su posición, el receptor debe conocer las posiciones de los satélites. Las estaciones de seguimiento registran datos de pseudodistancia y medidas de fase que mandan a la Estación de Control principal, donde con un sofisticado software se predicen las futuras posiciones orbitales de los satélites, es decir sus efemérides. Éstas son transmitidas en el mensaje de navegación del satélite. Pero las efemérides transmitidas por los satélites tendrán asociado un error a causa de que es imposible predecir exactamente sus posiciones. El efecto del error de las efemérides transmitidas en la medida de la pseudodistancia se obtiene proyectando el vector error de la posición del satélite sobre el vector que une el satélite y el receptor. Los errores en los parámetros orbitales se pueden eliminar trabajando con las efemérides precisas de los días de observación, donde aparecen las verdaderas posiciones de los satélites.

Para líneas base cortas, trabajando en modo diferencial con dos receptores, respecto a los mismos satélites de observación, podemos eliminar todos los errores relativos a los satélites, ya que afectan de igual forma a ambos receptores. Para líneas base largas, el error del reloj del satélite se elimina igual, ya que es independiente de la línea base e igual en ambos puntos, pero los errores en los parámetros orbitales no se eliminan del todo, porque los errores que provocan en la pseudodistancia a un satélite en un punto no son los mismos que los que se producen en el otro punto para el mismo satélite e instante. El error depende de la orientación del vector error de la posición del satélite respecto de los vectores satélite-receptor para cada uno de los puntos.

3. ERRORES RELATIVOS A LA PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL.

La velocidad de propagación de la señal es crítica para cualquier sistema de medida de distancias. Esta velocidad multiplicada por el intervalo de tiempo en que se propagó la señal nos da una medida de la distancia. Si una onda electromagnética se propaga por el vacío, su velocidad de propagación, sea cual sea su frecuencia es la velocidad de la luz (c). Sin embargo, en el caso de observaciones GPS o GLONASS, las señales deben atravesar las capas de la atmósfera hasta llegar al receptor posicionado sobre la superficie de la tierra. Las señales interactúan con partículas cargadas, que provocan un cambio en la velocidad y dirección de propagación, es decir, las señales son refractadas. Cuando la señal viaja por un medio que no es

el vacío, ésta sufre un *retardo* debido a que la velocidad de propagación es menor. y a que la trayectoria aumenta su longitud al curvarse por refracción, si el medio no es isótropo.

REFRACCIÓN IONOSFÉRICA.

La Ionosfera es aquella región de la atmósfera comprendida entre 100 y 1000 Km de altitud, donde las radiaciones solares y otras radiaciones ionizan una porción de las moléculas gaseosas liberando electrones, que interfieren en la propagación de ondas de radio. La Ionosfera es un medio disperso para ondas de radio, por lo tanto su índice de refracción es función de la frecuencia de la onda. También es función de la densidad de electrones, y en menor grado, de la intensidad del campo magnético de la tierra.

Este error es negativo para la medida de fase (se produce un avance de la portadora y se miden distancias más pequeñas), y positivo para las pseudodistancias (se produce un retardo y se miden distancias más largas), pero tienen el mismo valor absoluto.

$$\lambda\Phi = \rho + c \Delta\delta + \lambda N - \Delta^{iono}(\Omega)$$

$$R = \rho + c\Delta\delta + \Delta^{iono}(\Omega)$$

El error es proporcional a la densidad de electrones (TEC-Total Electron Content) a lo largo del camino seguido por la señal, y está en función del cuadrado de la longitud de la onda (inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la portadora). Este error varía espacial y temporalmente, es decir, para cada punto según su latitud y longitud, y momento de la observación. Se pueden utilizar modelos ionosféricos, como el de Klobuchar (1986) que establecen la distribución del TEC, pero estas concentraciones de electrones son irregulares y poco predecibles, por lo que cualquier modelo ionosférico es sólo una aproximación. El TEC es función del cambio constante en la ionización solar, de la actividad magnética, de los ciclos de las manchas solares, hora del día, lugar de observación, y dirección del camino de la señal. Una expresión en primer orden de aproximación para este retardo es:

$$\Delta^{iono} = \frac{40.3}{c f^2} \text{TEC} = \frac{A}{f^2}$$

TEC => electrones por m³. (Valores observados de 10¹⁶ a 10¹⁸).

Debido a la dificultad de encontrar un modelo satisfactorio, se emplea un método más eficiente para eliminar la refracción ionosférica que es la utilización de dos señales con diferentes frecuencias. Como el retardo depende de la longitud de la onda, será distinto para cada frecuencia y podremos observar un retardo diferencial entre ambas, que será mayor cuanto mayor sea el retardo ionosférico sufrido, siendo por tanto este deducible.

También se pueden utilizar combinaciones de las observables que por su naturaleza estén libres del efecto ionosférico. Tal es el caso de la combinación de fases llamada "*combinación libre de efecto ionosférico*", en la que partiendo de la siguiente expresión:

$$\Phi_{L1L2} = n_1 \Phi_{L1} + n_2 \Phi_{L2}$$

lo que se pretende es obtener qué valores deben tener los coeficientes n_1 y n_2 para que los valores del efecto ionosférico que sufren ambas portadoras sea eliminado. Desarrollando esta expresión, se obtienen los valores de n_1 y n_2 para la *combinación libre de efecto ionosférico*, que quedaría de la forma:

$$\Phi_{1,2} = \Phi_{1,1} - \frac{f_{i,2}}{f_{i,1}} \Phi_{1,2}$$

La eliminación de la refracción ionosférica es la mayor *ventaja* de la combinación lineal libre de efecto ionosférico, pero el término libre de efecto ionosférico no es del todo correcto, ya que para su obtención hay que considerar algunas aproximaciones. Esta combinación libre de efecto ionosférico tiene la *desventaja* de que si N_{L1} y N_{L2} son valores enteros, la combinación da un valor : $N = n_1 N_{L1} + n_2 N_{L2} = N_{L1} - (f_{L2}/f_{L1})N_{L2}$, que no es un valor entero, luego el concepto de fijar las ambigüedades en este caso no se puede aplicar y este valor va a ser siempre un valor real.

Si sólo se registran medidas en una sola frecuencia, tanto en pseudodistancias como en medida de fase, entonces se tiene que emplear un procedimiento alternativo para eliminar el efecto ionosférico. Normalmente se usan modelos empíricos para corregir el efecto, en los que se modela el TEC en función del tiempo, lugar de observación y dirección de la señal. En el mensaje de navegación se incluyen unos parámetros para tal modelo. Usando este modelo se pueden llegar a reducir en un 50% los efectos de la Ionosfera.

Actualmente, estamos saliendo de un mínimo en la actividad de las manchas solares (11 años de ciclo), por lo que las condiciones ionosféricas son ahora más idóneas. Pero dentro de unos 4 años, estaremos cerca del máximo, y entonces los efectos de la Ionosfera en las señales serán mucho peores.

El retardo ionosférico depende del ángulo de elevación del satélite, siendo menor en el cenit, y mayor cuando disminuye el ángulo de elevación. En observaciones nocturnas, los niveles de TEC son menores que durante el día, lo que implica un menor error en la pseudodistancia.

Pero después de la aplicación del modelo empírico transmitido puede quedar algún error ionosférico residual que afectará principalmente a la componente altimétrica del punto y a la estimación del error del reloj del receptor. Este error contribuye poco a la posición planimétrica cuando la concentración de electrones encima del receptor es uniforme.

REFRACCIÓN TROPOSFÉRICA.

La Troposfera es la última zona o capa de la atmósfera (hasta unos 80 Km, pero sólo en los últimos 40 se producen retardos significativos), donde se produce retardo y donde las temperaturas decrecen con el incremento de altura. El espesor de la Troposfera no es el mismo en todas las zonas. La presencia de átomos y moléculas neutros en la Troposfera afecta a las señales de propagación electromagnética. El índice de refracción para un área parcial es función de su temperatura, de la presión de los gases secos y del vapor de agua. Esta atmósfera neutra es un medio no disperso con respecto a las ondas de radio de frecuencias superiores a 15 GHz, por lo tanto, la propagación es independiente de la frecuencia. Consecuentemente, no es necesario distinguir entre medidas de código y fase sobre las portadoras L1 y L2. La desventaja está en que no es posible eliminar la refracción troposférica con medidas en las dos frecuencias. El retardo troposférico experimentado por una señal que va desde un satélite a un punto en la superficie, puede ser expresado en primera aproximación por la siguiente integral a lo largo del camino recorrido por la señal:

$$\Delta^{Trop} = \int (n - 1) ds$$

Se introduce la aproximación de que la integral se realiza a lo largo del camino seguido por la señal. Usualmente, en lugar del índice de refracción se utiliza la refractancia:

$$N^{Trop} = 10^6 (n - 1)$$

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6} \int N^{Trop} ds$$

La integral puede ser evaluada conociendo el índice de refracción, o puede ser aproximada por funciones analíticas. Pero lo más normal es utilizar aproximaciones basadas en modelos atmosféricos simplificados. Algunos de estos modelos son: el modelo de Hopfield (1969), modelo de Saastamoinen (1972), modelo de Hopfield modificado, Goad y Goodman (1974), Black (1978), Robinson (1986), etc. En la mayoría de los casos, se considera por separado la *componente seca* y la *componente húmeda*:

$$N^{Trop} = N_d^{Trop} + N_w^{Trop}$$

donde la componente seca resulta de la atmósfera seca y la componente húmeda del vapor de agua.

Se puede mejorar el cálculo del retardo troposférico tomando datos meteorológicos en el lugar de observación. A diferencia de la componente seca, la componente húmeda varía espacialmente y temporalmente. La componente seca es la causante de un 90% del total del retardo y puede ser obtenido con precisión de algunos milímetros a partir de medidas de presión en superficie. La componente húmeda es función del vapor de agua a lo largo del camino de la señal.

El gradiente térmico admite modelación con precisión aceptable, pero el principal problema está en la forma de modelar el vapor de agua, que tiene una irregular distribución. El simple uso de medidas meteorológicas en superficie no puede dar la precisión alcanzable con los radiómetros de vapor de agua. Estos instrumentos miden la radiación basal que se recibe desde el espacio en la dirección de la observación, y son capaces de medir el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

El retardo se puede evaluar en 1.9-2.5 m en la dirección cenital e incrementa aproximadamente con la cosecante del ángulo de elevación, llegando a ser de 20-28 m a unos 5°.

El efecto del *retardo ionosférico* y el *troposférico* debido al vapor de agua sobre las emisiones de la banda radioeléctrica es menor cuanto mayor sea la frecuencia, o cuanto menor sea la longitud de la onda. La refracción ionosférica y troposférica puede ser eliminada trabajando en modo diferencial, pero esto es sólo cierto para líneas base pequeñas, donde las medidas de distancias satélite-receptor se ven afectadas de igual forma por la refracción. De otro modo, ya vimos que la refracción ionosférica puede ser eliminada utilizando una adecuada combinación de datos en doble frecuencia.

DISPONIBILIDAD SELECTIVA.

La Disponibilidad Selectiva supone una alteración o manipulación de la información que los satélites de la constelación GPS envían a los usuarios en su mensaje de navegación, manipulación que realiza el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD). Se actúa sobre los estados de los relojes y parámetros orbitales. Trabajando con posicionamiento relativo o diferencial se puede eliminar este error.

PÉRDIDAS DE CICLOS.

Las pérdidas de ciclos suponen un salto en el registro de las medidas de fase, producido por alguna interrupción o pérdida de la señal enviada por el satélite. Estas pérdidas de ciclos pueden ser causadas por la obstrucción de la señal del satélite debido a la presencia de árboles, edificios, puentes, montañas, etc. Esta causa es la más frecuente, pero también pueden ser debidas a una baja SNR (calidad señal-ruido) debido a unas malas condiciones ionosféricas, efecto multipath, receptores en movimiento, o baja elevación del satélite. Otra causa puede ser un fallo en el software del receptor, que conduce a un procesamiento incorrecto de la señal. Una última causa de pérdida de ciclo, aunque suele darse en raras ocasiones, es aquella debida a un mal funcionamiento del oscilador del satélite.

La detección de una pérdida de ciclo y su reparación requiere la localización del salto y determinación de su tamaño. La detección se lleva a cabo por medio de un chequeo o test de cantidad, estos test pueden ser medida de la fase en bruto, combinaciones de fase, combinaciones de código y fase, etc. Una vez determinado el tamaño de la pérdida de ciclo, la reparación se hace corrigiendo a todas las observaciones de fase siguientes para este satélite y su portadora, según una cantidad fija. El software interno del receptor es capaz (in situ) de detectar y corregir las pérdidas de ciclo.

EFECTO MULTIPATH.

El efecto multipath o multicamino es causado principalmente por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite en superficies cercanas al receptor. Estas señales reflejadas que se superponen a la señal directa son siempre más largas, ya que tienen un tiempo de propagación más largo y pueden distorsionar significativamente la amplitud y forma de la onda.

Este efecto puede ser considerablemente reducido eligiendo puntos de estación protegidos de reflexiones (edificios, vehículos, árboles, etc.), es decir, evitar las superficies reflectantes en las proximidades del receptor; y por un apropiado diseño de la antena, como es la utilización de planos de tierra, que reducen las interferencias de señales con baja elevación o incluso con elevación negativa, que son las que provocan el multipath, en otras palabras, se intenta reducir la intensidad de las señales secundarias y aislar a la señal directa. El efecto multipath depende de la frecuencia de la portadora. Por lo tanto, las medidas de fase se verán menos afectadas que las medidas de código, donde el efecto multipath puede alcanzar hasta el nivel de metro.

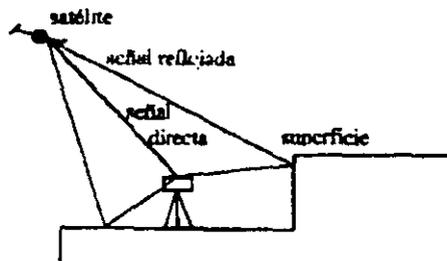


Figura 2. Efecto Multipath.

ERRORES RELATIVOS AL RECEPTOR.

ERROR DEL RELOJ.

Cuando un receptor recibe una señal de un satélite, en ese momento su reloj interno tendrá un desfase o error con respecto a la Escala de Tiempo. Este error afectará a todas las medidas de pseudodistancias realizadas para cada época.

Los errores en los osciladores de los receptores los podemos eliminar trabajando con posicionamiento relativo por medidas de fase, planteando las ecuaciones de dobles diferencias.

ERROR EN EL ESTACIONAMIENTO DE LA ANTENA.

Los errores en el estacionamiento de la antena tienen menos influencia y las exigencias de estacionamiento son muy inferiores a las de los instrumentos de observación clásica. No necesitan una altísima estabilidad, ya que pequeños desplazamientos, vibraciones o torsiones en nada afectan a la observación de las señales de los satélites.

ERRORES EN LA MANIPULACIÓN DE LOS EQUIPOS.

Los errores de manipulación se producen cuando no se siguen las instrucciones del fabricante del instrumento o cuando éstas suelen descuidarse cuando se trabaja rutinariamente.

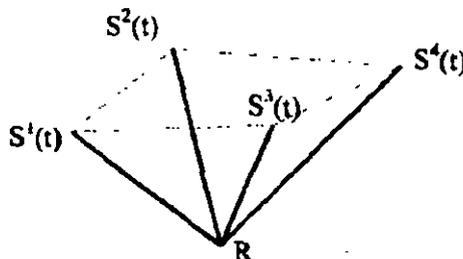
Por ejemplo, es importante no comenzar una observación hasta que no se hayan sincronizado perfectamente todos los satélites, ya que lo único que estaremos haciendo es introducir ruido a la observación.

VARIACIÓN DEL CENTRO RADIOELÉCTRICO DE LA ANTENA.

La variación y desfase del centro de la antena se debe a la falta de coincidencia entre el centro radioeléctrico o punto que realmente se posiciona, ya que es el punto al que llega la señal; y el centro mecánico o físico, generando un error residual por excentricidad que puede ser de unos milímetros. Para evitar este error en posicionamiento relativo se recomienda una orientación aproximada común para todas las antenas, ya que el fabricante monta en el interior de todas las carcasas el elemento físico receptor en la misma posición respecto a alguna referencia exterior del conjunto, y trabajando en modo diferencial este error se eliminará en ambas estaciones.

DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN.

La geometría de los satélites visibles es un factor importante a la hora de conseguir altas precisiones en el posicionamiento de un punto. Dicha geometría cambia con el tiempo como consecuencia del movimiento orbital de los satélites. Un factor que mide la bondad de esta geometría es el denominado factor de dilución de la precisión (dilution of precision , **DOP**).



El valor del DOP puede ser interpretado geoméricamente como el volumen del cuerpo formado por los satélites y el receptor. Cuanto mayor sea el volumen de este cuerpo mejor será la geometría, y por lo tanto menor será el valor del DOP, siendo el valor ideal la unidad. Como ya se vio anteriormente, el

valor del DOP es el factor por el que debe ser multiplicado el error obtenido en las pseudodistancias para obtener el error final en el posicionamiento. Los valores de DOP más utilizados son los siguientes:

- * **GDOP:** Dilución de precisión en posición y estado del reloj.
- * **PDOP:** Dilución de precisión en posición.
- * **TDOP:** Dilución de precisión en el estado del reloj.
- * **HDOP:** Dilución de precisión en planimetría.
- * **VDOP:** Dilución de precisión en altimetría.
- * **RDOP:** Dilución de precisión relativa entre dos puntos.

PROCESAMIENTO DE DATOS.

INTRODUCCIÓN. MODELO DE AJUSTE POR MMCC.

Antes de introducirnos en el procesamiento de los datos, ya sea para el cálculo de *posicionamientos absolutos* o puntos singulares (single points), o para el cálculo de *posicionamientos diferenciales*, debemos analizar el modelo de ajuste a utilizar.

Se pueden utilizar diversas técnicas de ajuste, pero aquí nos vamos a basar en el método de ajuste estándar por mínimos cuadrados, basado en la utilización de una serie de ecuaciones, donde las observaciones son expresadas en función de los parámetros incógnitas. En el caso de que las ecuaciones no sean lineales, es preciso linealizarlas por medio del desarrollo en serie de Taylor, para lo cual es preciso conocer unos valores aproximados de las incógnitas. El desarrollo en serie de Taylor puede ser truncado a partir de los términos de segundo orden, con el fin de obtener una función lineal con respecto a las incógnitas.

El modelo de observación lineal conseguido tras aplicar el desarrollo en serie de Taylor, puede ser expresado en forma matricial de la siguiente forma : $L = A \cdot x$.

Donde :

L : Vector columna de las observaciones.

A : Matriz de diseño.

x : Vector columna de las incógnitas.

Si suponemos el caso en el que tengamos "n" ecuaciones y "u" incógnitas, siendo $n > u$, entonces la matriz de diseño, A , tendrá "n" filas y "u" columnas. Pero para estas condiciones, tendremos un sistema de ecuaciones compatible sobredeterminado (es decir existen más ecuaciones que incógnitas), y por lo general, debido a los errores inherentes de la observación, no será un sistema consistente, existiendo unos residuos, V, para cada ecuación. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos residuos, el modelo queda de la forma :

$$L + V = A \cdot x$$

La resolución de este sistema se realiza aplicando el principio de mínimos cuadrados, que es:

$V^T P V = \text{mínimo}$. La aplicación de este principio en las ecuaciones de observación lleva al siguiente sistema de ecuaciones normales:

$$A^T \cdot P \cdot A \cdot x = A^T \cdot P \cdot L$$

donde la solución para los parámetros incógnita, x, es:

$$x = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L$$

que puede ser simplificada por:

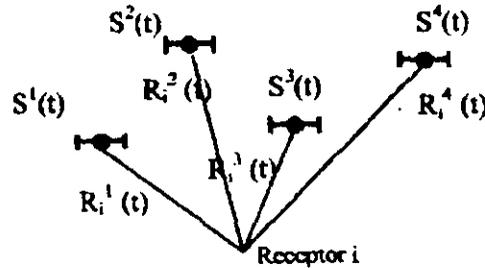
$$x = N_A \cdot t$$

donde $N_A = (A^T \cdot P \cdot A)$ y $t = A^T \cdot P \cdot L$.

CÁLCULO DE POSICIONAMIENTOS ABSOLUTOS.

La expresión de la pseudodistancia para medidas de código para una época t correspondiente al receptor "i" y al satélite "j", tiene la siguiente expresión:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_i(t)$$



Siendo:

$R_{ij}(t)$: La pseudodistancia entre el satélite y el receptor.

$\rho_{ij}(t)$: La distancia geométrica real entre el satélite y el receptor.

c : Velocidad de la luz en el vacío.

$\Delta\delta_{ij}(t)$: Término que representa los errores o desfases de los relojes respecto a la escala de tiempos.

Pero en esta ecuación, la expresión de la distancia geométrica real entre satélite-receptor, ρ , tiene una forma no lineal, y por lo tanto, tendremos que linealizarla aplicando el desarrollo en serie de Taylor y partiendo de unos valores aproximados de las coordenadas del punto (X_{io}, Y_{io}, Z_{io}). En el modelo que vamos a considerar, únicamente tendremos en cuenta los errores de los relojes, sin considerar los efectos ionosféricos y troposféricos. La ecuación, una vez linealizada la expresión de la pseudodistancia queda de la siguiente forma:

$$R_i^j(t) = \rho_{io}^j(t) - \frac{X^j(t) - X_{io}}{\rho_{io}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{io}}{\rho_{io}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{io}}{\rho_{io}^j(t)} \Delta Z_i + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_i(t)$$

siendo i el punto sobre la superficie y j el satélite. Operando, y dejando en la parte derecha de la expresión únicamente los parámetros incógnita y en la izquierda los valores conocidos, tenemos que:

$$R_i^j(t) - \rho_{io}^j(t) - c \cdot \delta^j(t) = - \frac{X^j(t) - X_{io}}{\rho_{io}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{io}}{\rho_{io}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{io}}{\rho_{io}^j(t)} \Delta Z_i + c \cdot \delta_i(t)$$

el término $\delta_i(t)$ no se considera como incógnita, puesto que se supone conocido a partir de los datos que envía el satélite en su mensaje de navegación.

La expresión anterior, válida para la época t contiene cuatro incógnitas ($\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i, \delta_i(t)$), por lo tanto, si dispusiéramos de una única época t y quisiéramos resolver el sistema, necesitaríamos un mínimo de 4 satélites. En este caso, nos encontramos ante un sistema compatible determinado, en el que existe solución única. El sistema de ecuaciones formado por las 4 pseudodistancias a los 4 satélites se podría expresar de la forma $A \cdot x = L$, y los valores de las incógnitas los obtendríamos mediante $x = A^{-1} \cdot L$. Si se mide el valor de la pseudodistancia a un nº de satélites mayor que 4, sean j satélites en una época t , se puede plantear un sistema de j ecuaciones de pseudodistancia con 4 incógnitas y resolver por MMCC, siendo la expresión del vector de incógnitas, x , como se vio anteriormente, es decir,

$$x = N_{(j-1)} \cdot t$$

Obteniendo los valores de las incógnitas del punto $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ para cada época t , podemos añadir estos valores a las coordenadas aproximadas del punto y obtener los valores X, Y, Z de las coordenadas del punto de estación. Hay que recalcar que la selección de los valores aproximados de las coordenadas del punto es completamente arbitraria, incluso pueden ser cero, pero esto requiere más iteraciones.

El posicionamiento absoluto de un punto se puede aplicar en cada época. Pero si tenemos un cierto nº de épocas registradas, podremos resolver el sistema para cada época, obteniendo las coordenadas del punto en cada época y luego hacer una media de todas estas coordenadas para obtener una mejor solución en el posicionamiento del punto. Este proceso de cálculo recibe el nombre de “ **cálculo de un punto simple o *single point* ”**.

Todo este proceso de cálculo de medidas de pseudodistancia por código puede ser planteado para la portadora L1 y para la portadora L2, utilizando el código C/A o P, y el código P, respectivamente. También es posible realizar posicionamientos absolutos con medidas de fase, pero no son aplicables debido a que resulta muy cara la herramienta para la precisión esperada.

CÁLCULO DE POSICIONAMIENTOS DIFERENCIALES.

Mientras que en el *posicionamiento absoluto* sólo interviene un único receptor, del que se pretenden obtener sus coordenadas directamente a partir de las pseudodistancias a los satélites, en el *posicionamiento diferencial* intervienen dos receptores y el objetivo de este tipo de posicionamiento es la determinación de las coordenadas de un punto desconocido a partir de otro punto, cuyas coordenadas son conocidas y del cálculo de la línea base que los une.

Sea A un punto conocido, B un punto desconocido y v_{AB} el vector que los une, podemos expresar el vector de posición de B a partir del vector de posición de A por medio de la siguiente expresión:

$$X_B = X_A + v_{AB}$$

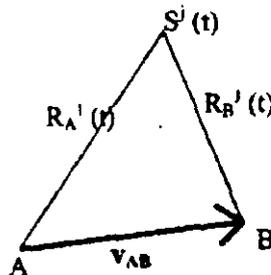
Las componentes del vector son:

$$v_{AB} = \begin{pmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{pmatrix}$$

CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR CÓDIGO.

Partiendo de la ecuación de la pseudodistancia para medidas de código, ésta puede ser planteada para dos puntos A y B observando a un mismo satélite j y en una misma época de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} R_A^j(t) &= \rho_A^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_A(t) \\ R_B^j(t) &= \rho_B^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_B(t) \end{aligned}$$



El vector v_{AB} puede ser expresado como diferencia de ambas pseudodistancias:

$$v_{AB} = R_B^j(t) - R_A^j(t) = R_{AB}^j(t)$$

Sustituyendo los valores de $R_{Aj}(t)$ y $R_{Bj}(t)$, se elimina el error del reloj del satélite, quedando:

$$\begin{aligned} v_{AB} &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - c \cdot \delta_B(t) + c \cdot \delta_A(t) = \\ &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) + c \cdot (\delta_A(t) - \delta_B(t)) = R_{AB}^j(t) \end{aligned}$$

Esta expresión representa la *ecuación en simple diferencias* para posicionamiento relativo por medida de código.

Sustituyendo en la expresión anterior, los valores de $\rho_{Aj}(t)$ y $\rho_{Bj}(t)$ por su expresión linealizada, y colocando los términos conocidos a la izquierda, queda:

$$\begin{aligned} R_{AB}^j(t) - \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^j(t) &= - \frac{X^j(t) - X_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j(t) - Y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j(t) - Z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Z_B \\ &+ \frac{X^j(t) - X_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta X_A + \frac{Y^j(t) - Y_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta Y_A + \frac{Z^j(t) - Z_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta Z_A \\ &+ c \cdot (\delta_A(t) - \delta_B(t)) \end{aligned}$$

donde inicialmente el n° de incógnitas es 8. Sin embargo, para posicionamiento relativo o diferencial se supone un punto conocido, sea A, y por lo tanto $.x_A = .y_A = .z_A = 0$, y la expresión queda:

$$\begin{aligned} R_{AB}^j(t) - \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^j(t) &= - \frac{X^j(t) - X_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j(t) - Y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j(t) - Z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Z_B \\ &+ c \cdot (\delta_B(t) - \delta_A(t)) \end{aligned}$$

dónde las incógnitas se reducen a 5. Una ecuación de este tipo puede ser planteada para cada época t y para cada satélite j , por lo tanto para resolver el sistema en una época se necesitan un mínimo de 5 satélites. Si el nº de satélites es mayor se realiza un ajuste por mínimos cuadrados, como ya vimos en el caso de posicionamiento absoluto.

Por cada época que aumentemos tendremos 2 nuevas incógnitas de los relojes $\delta_B(t)$ y $\delta_A(t)$. Si tenemos un cierto nº de épocas, podemos resolver el sistema para cada época, calculando un valor de $R_{AB}(t_i)$, y luego hacer una media entre todos los valores obtenidos.

Todo este proceso puede ser planteado tanto para la portadora L1 como para la portadora L2, donde la notación de las expresiones sería $R_{ABjL1}(t_i)$ y $R_{ABjL2}(t_i)$, para cada satélite j y cada época t_i .

CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR FASE.

Simple diferencias.

Partiendo de la ecuación de pseudodistancias para medidas de fase :

$$\Phi_j^i(t) - f \delta^i(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_j^i(t) + N_j^i - f \delta_i(t)$$

ésta puede ser planteada para dos puntos A y B observando a un mismo satélite en una misma época t , de la forma siguiente:

$$\Phi_A^j(t) - f \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + N_A^j - f \delta_A(t)$$

$$\Phi_B^j(t) - f \delta^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) + N_B^j - f \delta_B(t)$$

Restando ambas ecuaciones, tendremos:

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} (\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)) + N_B^j - N_A^j - f \cdot (\delta_B(t) - \delta_A(t))$$

obteniendo la **ecuación en simple diferencias**. Podemos reducir la expresión considerando las siguientes notaciones:

$$N_{AB}^j = N_B^j - N_A^j$$

$$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$$

$$\Phi_{AB}^j(t) = \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t)$$

$$\rho_{AB}^j(t) = \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)$$

Sustituyendo en la ecuación de simples diferencias:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f \delta_{AB}(t)$$

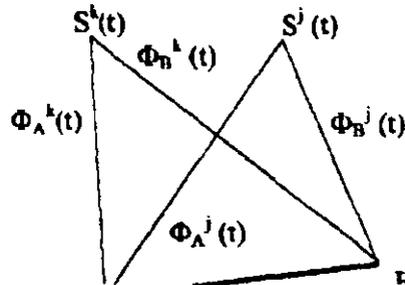
Obteniendo la forma final de la *ecuación de simples diferencias*, donde podemos comprobar que se ha eliminado el error del estado del reloj del satélite ($\delta_j(t)$).

Doble diferencias.

Suponiendo que tenemos dos receptores situados en los puntos de estación A y B, y dos satélites "j" y "k", podemos obtener dos expresiones en simple diferencia:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f \delta_{AB}(t)$$

$$\Phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - f^k \delta_{AB}(t)$$



Si las frecuencias de emisión de los dos satélites son las misma ($f_j = f_k$), restando ambas expresiones obtenemos la *ecuación en dobles diferencias* :

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} (\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)) + N_{AB}^k - N_{AB}^j$$

podemos simplificar la expresión de la siguiente forma:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}$$

Donde:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \Phi_B^k(t) - \Phi_B^j(t) - \Phi_A^k(t) + \Phi_A^j(t)$$

$$\rho_{AB}^{jk}(t) = \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^j(t)$$

$$N_{AB}^{jk}(t) = N_B^k(t) - N_B^j(t) - N_A^k(t) + N_A^j(t)$$

Como podemos comprobar en esta ecuación de doble diferencias se han eliminado las incógnitas de los estados de los relojes de los receptores. Esto es válido para el caso en el que se realicen observaciones simultáneas y siendo iguales las frecuencias de las señales de los satélites.

Triple diferencias.

Hasta ahora hemos considerado únicamente una época. Pero para eliminar la incógnita de las ambigüedades es necesario hacer la diferencia de dos ecuaciones de doble diferencias para dos épocas. Denotando las dos épocas por t1 y t2, tenemos:

$$\Phi_{AB}^k(t_1) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t_1) + N_{AB}^k$$

$$\Phi_{AB}^k(t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t_2) + N_{AB}^k$$

Restando ambas expresiones de doble diferencias, tendremos:

$$\Phi_{AB}^k(t_2) - \Phi_{AB}^k(t_1) = \frac{1}{\lambda} (\rho_{AB}^k(t_2) - \rho_{AB}^k(t_1))$$

obteniendo la **ecuación de triple diferencias**, que puede ser simplificada de la forma:

$$\Phi_{AB}^k(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t_{12})$$

Donde:

$$\Phi_{AB}^k(t_{12}) = \Phi_B^k(t_2) - \Phi_B^k(t_1) - \Phi_A^k(t_2) + \Phi_A^k(t_1) + \Phi_N^k(t_1) - \Phi_N^k(t_2) + \Phi_A^k(t_1) - \Phi_A^k(t_2)$$

$$\rho_{AB}^k(t_{12}) = \rho_B^k(t_2) - \rho_B^k(t_1) - \rho_A^k(t_2) + \rho_A^k(t_1) + \rho_N^k(t_1) - \rho_N^k(t_2) + \rho_A^k(t_1) - \rho_A^k(t_2)$$

Existen dos grandes ventajas a la hora de trabajar con ecuaciones en triple diferencias como son:

- La eliminación de la incógnita N (ambigüedades).
- La inmunidad de las ecuaciones en triple diferencias a los cambios en las ambigüedades, estos cambios son denominados *pérdidas de ciclo*.

Para desarrollar el cálculo del posicionamiento diferencial con medidas de fase vamos a partir del modelo de ecuación de doble diferencias, que multiplicada por λ para pasar a unidades de longitud, se obtiene:

$$\lambda \Phi_{AB}^k(t) = \rho_{AB}^k(t) + \lambda N_{AB}^k$$

donde el término ρ_{AB}^k , contiene las siguientes distancias geométricas:

$$\rho_{AB}^k(t) = \rho_B^k(t) - \rho_N^k(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^k(t)$$

y cada uno de estos cuatro términos debe ser linealizado partiendo de unos valores aproximados de la coordenadas de los puntos.

Si pasamos los términos conocidos a la parte izquierda de la expresión, el término que denotaremos por $I_{jk\Lambda AB}(t)$ de valores conocidos será:

$$I_{AB}^k(t) = \lambda \Phi_{AB}^k(t) - \rho_{B_0}^k(t) + \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^k(t) - \rho_{A_0}^j(t)$$

el cual comprende el valor medido $\lambda \Phi_{jk\Lambda AB}(t)$ por diferencia de fase y los términos calculados a partir de los valores aproximados de las coordenadas. La ecuación de doble diferencias en su expresión linealizada es:

$$I_{AB}^k(t) = a_{XA}^k(t) \cdot \Delta X_A + a_{YA}^k(t) \cdot \Delta Y_A + a_{ZA}^k(t) \cdot \Delta Z_A + a_{XB}^k(t) \cdot \Delta X_B + a_{YB}^k(t) \cdot \Delta Y_B + a_{ZB}^k(t) \cdot \Delta Z_B + \lambda \cdot N_{AB}^k$$

donde los coeficientes $a_{jk}(t)$ forman parte de la linealización de la expresión de las distancias geométricas receptor-satélite. Esta expresión representa el caso general de una línea base donde los dos puntos son desconocidos. Sin embargo, en el posicionamiento diferencial las coordenadas de un punto deben ser conocidas, y por lo tanto se reduce el número de incógnitas. Si suponemos que el punto A es conocido, entonces $\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A = 0$, y la expresión queda de la forma:

$$I_{AB}^k(t) = \lambda \Phi_{AB}^k(t) - \rho_{B_0}^k(t) + \rho_{B_0}^j(t) + \rho_A^k(t) - \rho_A^j(t)$$

$$I_{AB}^k(t) = a_{XB}^k(t) \cdot \Delta X_B + a_{YB}^k(t) \cdot \Delta Y_B + a_{ZB}^k(t) \cdot \Delta Z_B + \lambda \cdot N_{AB}^k$$

Tomando un satélite de referencia, sea j, una ecuación de este tipo puede ser planteada para cada época t y para cada satélite con el de referencia j. Para una época inicial ω , el número entero de longitudes de onda para un satélite S será N. Este valor de N se puede expresar como:

$$N = N_0 + \Delta N$$

donde N_0 es el valor aproximado de las ambigüedades para la época ω inicial, calculado a partir de las coordenadas aproximadas del punto, por lo tanto, nuestra incógnita, en realidad es el valor de ΔN , que tenemos que sumar al valor inicial N_0 para obtener el valor de la ambigüedad inicial. Este valor de N se puede considerar constante en el tiempo, y cada vez que la distancia satélite-receptor varíe en una vez el valor de la longitud de la onda, el valor de N variará en una unidad. Por lo tanto, si en un momento determinado calculamos N (el de la época inicial), podremos posteriormente calcular los N para el resto de épocas, ya que los $\Delta \Phi$ de cada época con respecto a la época inicial son conocidos, gracias a las mediciones de diferencia de fase. Hay que considerar un valor N de ambigüedad de cada satélite para la época inicial ω , y a partir de aquí considerar el valor de N constante en el tiempo.

Se plantea un sistema de ecuaciones de doble diferencias y se resuelve por MMCC como en los casos anteriores. Se obtienen las coordenadas del punto desconocido y el valor, en número real, de las ambigüedades. Con este valor real de N tenemos que llegar al valor entero utilizando una de las técnicas de búsqueda de ambigüedades.

Las coordenadas aproximadas del punto desconocido se obtienen planteando las ecuaciones de triple diferencias donde se eliminaba el valor de la ambigüedad. Esta solución sólo puede ser aproximada debido a la correlación que existe en estas ecuaciones, pero que sin embargo, mejora la solución del punto obtenida por medidas de código. Estos valores aproximados de X_{B_0}, Y_{B_0} , y Z_{B_0} serán utilizados para los valores de $\rho_{B_0}^k(t)$ a cada uno de los satélites en cada época en las ecuaciones de dobles diferencias.

Todo esto puede ser planteado tanto para la portadora L1 como para la portadora L2. Si se poseen medias de fase sobre ambas portadoras L1 y L2 pueden ser planteadas algunas de las combinaciones tratadas.

Técnicas para la resolución de ambigüedades.

a) Resolución de ambigüedades para medidas de fase de una sólo frecuencia.

Este método tiene su más directa aplicación cuando sólo se dispone de las medidas de fase en una única frecuencia (L1 o L2). Las medidas son modeladas por medio de la ecuación anterior, y tras linealizarla es procesada. Dependiendo del modelo elegido, se tienen en cuenta en un ajuste común las incógnitas (coordenadas del punto, errores de los relojes, ...) junto con el valor de N. La naturaleza entera del valor de N se pierde y es estimado como valor real. Para fijar las ambigüedades a valores enteros, se realiza un ajuste secuencial, analizando la desviación estandar de N para ser determinada con mayor fiabilidad.

b) Resolución de ambigüedades para medidas de fase de doble frecuencia.

La resolución de ambigüedades para medidas de fase de doble frecuencia cambia significativamente. Hay muchas ventajas en este caso porque se pueden formar varias combinaciones lineales. Se han propuesto varias técnicas como la de la *banda ancha*, y la de la *banda estrecha*.

La expresión de la banda ancha es la siguiente : $\Phi_w = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}$. La frecuencia de esta señal es $f_w = 347,82$ MHz y la longitud de onda correspondiente es $\lambda_w = 86,2$ cm. Esto significa un incremento importante comparado con las longitudes de onda originales 19 cm (L1) y 24,4 cm (L2). El uso de la banda ancha (L_w) proporciona una reducción del espacio búsqueda de ambigüedades. Esto es la clave para una solución más sencilla del valor entero de las ambigüedades. El ajuste basado en el modelo de banda ancha da como resultado ambigüedades de banda ancha N_w , que son más fáciles de resolver que las ambigüedades de la portadora base.

Lo mismo ocurre cuando se utiliza la banda estrecha.

Técnica de búsqueda.

La información resultante de la matriz de varianza-covarianza del ajuste de las ambigüedades, puede ser usada como una técnica de búsqueda. En esta técnica, todos los valores enteros localizados en una determinada región de confianza alrededor de la solución, son considerados candidatos para la solución final de la ambigüedad. Por lo tanto, todas las combinaciones posibles de estas ambigüedades son consideradas como valores conocidos y sustituidos en subsiguientes ajustes. Del conjunto de soluciones, la mejor solución que se toma es la combinación de valores enteros en los que es menor el error medio cuadrático para la posición que es tomada como mejor solución. Esta solución se elige cuando el ratio (que indica la fiabilidad del cálculo) del error medio cuadrático entre la mejor y la segunda mejor solución es mayor de 2 ó 3. Este método solo se aplica para el cálculo de una única línea base.

Un método ligeramente más sofisticado es el denominado Método Rápido de Resolución de Ambigüedades por Aproximación (*FARA*), desarrollado por Frei y Beutler (1992). Las principales características de este método son:

- Usa información estadística del ajuste inicial para seleccionar un rango de búsqueda.
- Usa información de la matriz de varianza-covarianza para rechazar el conjunto de ambigüedades que no son aceptables desde un punto de vista estadístico.
- Aplica hipótesis estadísticas para seleccionar los valores correctos de las ambigüedades.

El algoritmo de FARA puede ser dividido en cuatro pasos:

- Cálculo de una solución flotante para la portadora.
- Elección de los conjuntos de valores de las ambigüedades que serán testeadas.
- Cálculo de una solución fija para cada conjunto de valores de las ambigüedades.
- Comprobación o chequeo estadístico de la solución fijada con la menor varianza.

Se estiman valores reales para las ambigüedades en doble diferencias basándose en las medidas de fase sobre la portadora y realizando un ajuste donde se calcula la matriz cofactor de las incógnitas y la varianza a posteriori de la unidad de peso, de donde se puede calcular la matriz de varianza-covarianza de las incógnitas y las desviaciones estándar de las ambigüedades. El criterio para elegir los valores de las ambigüedades que serán testeadas, está basado en los intervalos de confianza de los valores reales de las ambigüedades. Con este y 51 otros criterios se pretende reducir el número de posibles conjuntos de valores enteros de las ambigüedades. Incluso una más impresionante reducción se consigue si se dispone de medidas de fase en dos frecuencias. Seguidamente se realiza un ajuste por mínimos cuadrados con valores aproximados de las ambigüedades para cada conjunto de valores de las ambigüedades, consiguiendo componentes de líneas base ajustadas y un factor de varianza a posteriori. Finalmente se investiga la solución con la menor varianza a posteriori. Las componentes de la línea base para esta solución son comparadas con la solución flotante o fluctuante (float). Si la solución es compatible, se acepta. Esta *compatibilidad* puede ser chequeada por medio de la distribución χ^2 , que testea la compatibilidad de la varianza a posteriori con la varianza a priori.

Lo que es más, se puede aplicar un test de Fisher a la solución con la menor varianza y a la de segunda menor varianza para asegurar que no están correlados. Euler en 1990 presentó técnicas de búsqueda muy eficientes y rápidas, basadas en la técnica FARA. Primero, se introduce un conjunto de valores enteros de las ambigüedades en el proceso de ajuste, consiguiéndose de este modo un constreñimiento de las soluciones de las ambigüedades, así como del valor de la varianza a posteriori. La influencia de otros conjuntos de ambigüedades sobre la solución inicial y la varianza a posteriori se determina sin recalcular el ajuste enteramente. Esta influencia puede ser calculada por medio de alguna matriz simple y por la intervención de un vector donde debe ser invertida solo una matriz reducida con la dimensión de las ambigüedades constreñidas.

3.4.-MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO.

Podemos diferenciar dos modos de posicionamiento, y dentro de ellos las variantes que se pueden considerar. Fundamentalmente son el absoluto y el diferencial.

1. POSICIONAMIENTO ABSOLUTO.

Se realiza con un único receptor, y consiste en la solución de una intersección directa de todas las distancias receptor-satélite sobre el lugar de estación en un período de observación dado. La medida y la solución son por lo tanto directas.

Para llevar a cabo el posicionamiento, el receptor recibe las señales de los satélites y determina su posición en coordenadas absolutas y en el sistema de referencia al que están referidos los satélites. Las observables utilizadas para el posicionamiento absoluto suelen ser los códigos, pero también se podrían utilizar las diferencias de fase o ambas.

Para resolver un posicionamiento absoluto es necesario recibir la información de al menos cuatro satélites, ya que cada uno de ellos proporciona una ecuación al sistema y nuestras incógnitas son cuatro (X,Y,Z y estado del reloj del receptor). 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 multipath, 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 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 minimocuadrático en el que la redundancia del sistema está en función del tiempo de observación. Se habla entonces de los posicionamientos absolutos más precisos (puntos singulares o "single point").



Situación de un posicionamiento absoluto.

2. POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL.

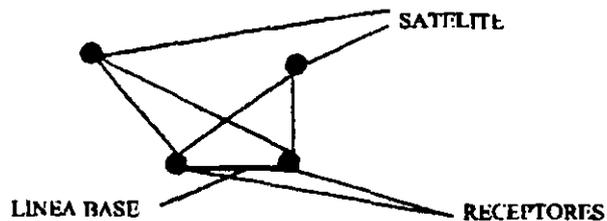
Es el que se realiza cuando las precisiones requeridas son mayores. Será mejor o peor en función del instrumental utilizado y la técnica de posicionamiento diferencial a la que se recurra.

El 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_0 , Y_0 , Z_0) 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, explicados en el capítulo anterior, 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.



Situación de un posicionamiento diferencial.

Dependiendo de las observables, instrumental de observación y software de cálculo utilizados, podemos citar las siguientes técnicas o métodos posicionamiento diferencial:

- **Estático.** Este modo de posicionamiento consiste en el estacionamiento de receptores que no varían su posición durante la etapa de observación. La referencia puede establecerse en cualquiera de ellos y la precisión será función del tiempo de observación, de la geometría y del instrumental utilizado.

Una variante del método estático es el denominado *estático rápido*, el cual se puso en funcionamiento gracias a la inclusión de algoritmos de tratamiento de las señales y espacios de búsqueda de ambigüedades más sólidos y rápidos. De este modo, el tiempo de observación y de cálculo se reducen considerablemente. Sirva como ejemplo que este tiempo se puede reducir a diez minutos en instrumentos monofrecuencia y a un minuto en instrumentos bifrecuencia.

Podemos dar una relación de tiempos mínimos y tiempos aconsejables de un modo general en los cuales los resultados ya son satisfactorios:

	Tiempo mínimo	Tiempo óptimo
Instr. monofrecuencia	10 min	20 min.
Instr. bifrecuencia	1 min.	10 min

Cuando la distancia entre puntos supera los cien kilómetros o la diferencia de altitud entre ellos supera los 500 m, se debe plantear el prolongar estos tiempos de observación para contrarrestar los errores producidos por la Ionosfera y la Troposfera.

El método estático es el que mayor precisión proporciona, pero también es el que más tiempo de observación requiere. Se pueden obtener precisiones mejores de una parte por millón si utilizamos las observables de diferencia de fase.

Este método está especialmente indicado para:

- * Confección de redes fundamentales en las cuales se vayan a apoyar trabajos de

Cartografía, Fotogrametría o proyectos de ingeniería.

- * Obtención de puntos de apoyo fotogramétrico y control de puntos existentes.
- * Control de deformaciones en superficies y estructuras.
- * Proyectos de investigación sobre el comportamiento y estructura de la atmósfera terrestre, como afecta a las señales, estudio de precisiones, etc.

No obstante, este método tiene la ventaja de que siempre se puede recurrir a él en caso de problemas con la aplicación de otro, ya que es válido para cualquier aplicación. No hay que olvidar que es el método fundamental y en el que se apoyan el resto de métodos de posicionamiento diferencial.

- Reocupación o pseudoestático.

El método de posicionamiento es el estático, pero puede ocurrir que las condiciones de observación no sean idóneas, bien porque la bondad de la geometría es muy alta ($GDOP > 8$) o bien porque disponemos de menos de cuatro satélites por apantallamientos u obstrucciones.

Para poder dar solución al problema, volvemos a repetir la puesta al cabo de un cierto período (que puede ser visionado con los programas de planificación de observaciones a través de almanaques radiodifundidos), con el fin de obtener información de satélites distintos a los de la primera puesta. Para resolver el problema, el software mezcla los datos de las dos puestas para formar un único sistema de resolución como si todo se hubiera realizado una sola vez.

Por lo tanto, el estacionamiento es estático, y la reocupación una forma de solucionar problemas que surgen debido a la falta de información necesaria en posicionamientos estáticos.

Las aplicaciones y fundamentos en precisiones y tratamientos de observables son los mismos que los indicados en el método estático, aunque la precisión si que se puede ver mermada en ocasiones.

- Cinemático.

Este método constituye una solución eficaz al inconveniente de los posicionamientos estáticos que requerían períodos de observación prolongados. Esta indicado para el tratamiento de observables de diferencia de fase.

El fundamento es establecer una estación fija de referencia, estática, y otra estación móvil que va a realizar las puestas en los puntos que se consideren necesarios. Para desarrollar este método es necesaria una **inicialización**, que supone calcular todos los parámetros de la línea base que une el móvil y la referencia en un instante. Una vez hecho esto, se conservan los valores de las ambigüedades, lo que hace que el número de incógnitas se reduzca a tres (X, Y, Z del móvil), lo que requiere menos épocas de información para resolver el sistema y por lo tanto menor período de puesta. A modo de ejemplo, si tras la inicialización disponemos de información de seis satélites comunes entre la referencia y el móvil, tendremos en una época cinco ecuaciones en doble diferencia y tres incógnitas, por lo que ya podríamos resolver la posición del móvil. Si tomamos tres épocas, la redundancia es mayor y el resultado más fiable.

Si hemos establecido que una época son cinco segundos, tendremos la solución con tan sólo quince segundos de puesta. El problema puede ser resuelto en tiempo real o en post-proceso.

Este método presenta la gran ventaja de que con él se obtienen resultados fiables y con buena precisión en poco tiempo, pero presenta el inconveniente de la posible pérdida de señal.

Si esto se produce en un instante, las ambigüedades establecidas en la primera inicialización ya no sirven, lo que requiere un nuevo proceso de inicialización en el lugar donde se produjo la pérdida de señal.

Existen varios **modos de inicialización**:

* *Estático rápido*. Se realiza una puesta estática de varias épocas hasta que se haya determinado la posición del móvil de forma satisfactoria. Es el modo más lento de inicialización, y es función del tipo de instrumental utilizado, información recibida y potencia del algoritmo de cálculo. Puede variar de uno a algunos minutos.

* *Estática en punto conocido*. El método es análogo al anterior, pero más rápido, ya que al conocer tres de las incógnitas del sistema (X,Y,Z del móvil) las que quedan por determinar son únicamente los incrementos de los valores de ambigüedad. Por lo tanto, necesitamos menos ecuaciones y en consecuencia menor tiempo de observación para resolver el sistema. Puede variar entre uno y dos minutos en función del tiempo en que se establezcan las épocas de grabación y la potencia del software de cálculo.

* *En movimiento (OTF, On-The-Fly)*. Esta técnica desarrolla un algoritmo que aplica las observaciones recibidas en movimiento y resuelve el sistema sin tener que realizar puestas estáticas. Es muy cómoda, ya que estamos inicializando mientras nos dirigimos al punto objeto de posicionamiento.

La inicialización en modo OTF fue creada para aplicar técnicas de resolución cinemática a elementos que no pueden estar parados para efectuar inicializaciones estáticas, como son barcos y aviones, y facilitar las aplicaciones que les conciernen, como levantamientos batimétricos y vuelos fotogramétricos. En el caso del avión, el objeto es conocer las coordenadas de la cámara en el momento de las tomas, y en el caso del barco tener la información planimétrica puntual que completa las tres dimensiones con la medida directa de la ecosonda. Es evidente que si se produce una pérdida de señal, la inicialización se vuelve a realizar sin tener que detener los vehículos, cosa harto difícil en los dos casos mencionados.

Pero la inicialización OTF no solamente se aplica en estos campos, sino que actualmente los equipos de observación por satélite terrestres incorporan esta posibilidad para cualquier tipo de trabajo, por su seguridad, rapidez y comodidad. Si las condiciones son favorables, la inicialización se puede realizar en menos de un minuto.

Dentro del modo cinemático, se puede trabajar con el modo *continuo* (denominado cinemático propiamente dicho) o en modo *discontinuo* (stop & go).

- Stop & Go.

Para posicionar un punto con el receptor móvil (tras la inicialización satisfactoria) se realiza una parada en dicho punto de unas pocas épocas, después nos dirigimos al siguiente punto y actuamos de igual modo. El procedimiento se mantendrá hasta completar el trabajo o hasta sufrir una pérdida de señal que obligue a inicializar otra vez.

Este método es apropiado para el levantamiento de puntos cercanos entre sí. Es imprescindible mantener la verticalidad de la antena en todo momento. La precisión del método siempre es función del tipo de instrumentación utilizado. Puede llegar a ser de uno a cinco centímetros en el mejor de los casos. Las aplicaciones más comunes son:

- * Levantamientos taquimétricos en general.
- Determinación de superficies y parcelaciones.
- * Control y evolución de fenómenos y obras.
- * Densificación de información de una zona.
- * Obtención de perfiles transversales.

- Continuo.

También denominado cinemático propiamente dicho. En este caso, el receptor móvil no efectúa ninguna parada, normalmente porque no le es posible. Está indicado para el uso de estaciones móviles ubicadas en vehículos en movimiento, como aviones, trenes, camiones, barcos, turismos, etc. Para su aplicación, basta con indicar el tiempo transcurrido entre una grabación y otra (épocas de grabación) para posicionar las situaciones puntuales del receptor en movimiento continuo. Por ejemplo, si hemos establecido una época como cinco segundos, y queremos que el posicionamiento se produzca cada treinta segundos, deberán transcurrir seis épocas de observación para efectuar el posicionamiento. El intervalo de grabación (épocas) para el método cinemático es aconsejable que sea de cinco segundos o menos.

Este método presenta el mismo inconveniente que el anterior, que es la posible pérdida de señal. Si esto se produce, y se dispone del modo OTF, el vehículo no necesita detener su marcha. Las aplicaciones más comunes de este método son:

- * Determinación de la trayectoria de vehículos en movimiento.
- * Levantamientos batimétricos.
- * Navegación.
- * Determinación de itinerarios (carreteras, caminos, canales, rutas, líneas de enlace de redes, cauces fluviales, etc.).

DGPS. Aunque su traducción es "GPS diferencial", se utiliza esta terminología para trabajos diferenciales en los que solamente intervienen medidas de código (observables de tiempo). Ciertamente, que con las actuales técnicas de posicionamiento conjunto GPS/GLONASS este término no es correcto, pero se sigue utilizando.

Existen ocasiones en las que la precisión en los posicionamientos no requiere recurrir a técnicas de medición de diferencia de fase, lo que supone además un considerable ahorro en instrumental de observación.

El posicionamiento diferencial con medidas de código se realiza resolviendo sistemas en simples diferencias, donde las incógnitas son las tres coordenadas de los puntos y el estado del oscilador de los receptores en cada época.

Los resultados obtenidos con este método de posicionamiento son excelentes en muchos de los casos, siendo mejores en distancias mayores de 200 Km. Las precisiones pueden alcanzar en algunos casos el decímetro, pero los resultados son muy inestables, ya que la geometría de observación, la calidad de recepción de la señal (relación señal /ruido) y el funcionamiento del oscilador del receptor han de ser factores óptimos para obtener estos resultados. Para garantizarlos, se deben realizar puestas largas (15-30 min.) para que se dé la redundancia suficiente. Lo normal es asegurar los 30-50 cm.

La evolución de las técnicas de tratamiento de los códigos en la medida de distancias está siendo espectacular, y este método está llamado a ser la nueva alternativa a los trabajos topográficos y geodésicos por sus altos rendimientos, facilidad en el tratamiento de datos y menor coste económico.

No obstante, las medidas de código pueden ser "suavizadas" por las medidas de diferencia de fase (si en la recepción se obtuvieron éstas) para obtener rendimientos aún mejores. El proceso de los datos con código diferencial puede hacerse en tiempo real y en post-proceso.

Existe la posibilidad de trabajar en DGPS con un único receptor, al que se le debe sumar una unidad de control y un transmisor/receptor de radiofrecuencia que emite los datos de observación a una estación

central de referencia, que envía datos de posicionamiento en formato RTCM o RTCA a la estación móvil, obteniendo la posición en tiempo real.

Las aplicaciones más comunes del DGPS son:

- * Navegación de precisión.
- * Levantamientos y apoyo para cartografías de escalas menores de 1/5000.
- * Confección y actualización de sistemas de información geográfica.
- * Todo trabajo en general que no requiera precisiones mayores de 0,3-0,5 m.

TRABAJO EN TIEMPO REAL.

En primer lugar, debe quedar claro que el trabajo en tiempo real no es un método de posicionamiento por satélite, sino que es una forma de obtener los resultados una vez procesadas las observaciones.

El procesamiento de estas observaciones puede ser realizado con un software post-proceso, previa inserción de los datos de observación necesarios, ya sea en campo o en gabinete.

Ahora bien, este cálculo puede ser realizado de forma inmediata a la recepción de las observaciones y ser efectuado por la unidad de control, obteniendo las coordenadas en el instante, es decir, en tiempo real. Para ello, se incorporan los algoritmos de cálculo de los software post-proceso, o parte de ellos, a los controladores para este tipo de aplicaciones.

Esto, supone una gran ventaja, ya que todo el tiempo que se invierte en insertar, tratar, chequear y procesar los datos se suprime al obtener los resultados al instante. Pero también tiene una serie de inconvenientes, que lo serán mayores o menores en función del tipo de trabajo y las condiciones de la observación. Entre ellos destacan:

- * *La limitación de los radiomodem de emisión y transmisión de datos.* Chocamos con el problema de las licencias de frecuencias y potencias de señal permitidas. Un equipo que funcione con 0,5 w, que está permitido por las autoridades, está limitado a un radio de acción de unos pocos Km (7-8 Km con seguridad), lo que limita el 58 rendimiento del trabajo. Sin embargo, con potencias de señal mayores se puede llegar a trabajar en radios de hasta 50 km.
- * *Imposibilidad de chequear los ficheros de observación.*
- * *Limitación en las correcciones de tipo atmosférico.*
- * *Limitación en los procesos de transformación de coordenadas.*
- * *Pobre tratamiento e información estadística.*
- * *Escasa manipulación de los parámetros de cálculo.*

Es evidente que los fabricantes no van a proporcionar herramientas que den resultados erróneos, ya que pasan severos controles de calidad, pero puede ocurrir que en ocasiones, debido a malas recepciones de señal o a planteamientos equivocados en las observaciones se cometan errores que no pueden ser detectados si no se revisan los ficheros de proceso con información detallada y completa.

Por todo esto, es conveniente y recomendable que los usuarios incorporen en sus gabinetes un software completo de procesamiento de datos por satélite, para su uso en trabajos donde la precisión es muy importante y además para comprobar y verificar que se repiten los resultados obtenidos previamente en tiempo real.

En el argot actual de la Topografía aplicada al posicionamiento por satélite, se denomina *equipo de trabajo con módulo RTK* (Real Time Kinematic) a aquel que incorpora un software completo en la unidad de control y un sistema de transmisión de información que permite la obtención de resultados en

tiempo real. Los módulos RTK pueden procesar observables de código y de diferencia de fase, y son aplicables a cualquier trabajo donde el posicionamiento por satélite sea necesario.

Las fases del trabajo en tiempo real con módulo RTK son las siguientes:

- El equipo de trabajo mínimo son dos equipos de observación (sensor y antena), dos radiomodems (transmisor y receptor) y un controlador en la unidad móvil con un software de proceso de datos.
- En primer lugar, se estaciona el equipo de referencia (sensor, antena y radiomodem transmisor), que va a permanecer fijo durante todo el proceso. El radiomodem transmisor va a transmitir sus datos de observación por ondas de radio al receptor incorporado en el equipo móvil, que a su vez almacenará en la unidad de control.
- En segundo lugar, si el método escogido es el posicionamiento estático, el controlador calculará la posición del móvil en tiempo real. Si el método elegido es del tipo cinemático (stop & go o cinemático continuo), se debe proceder a la *inicialización*, necesaria para poder efectuar estos modos de posicionamiento. Tras efectuarse con éxito, se pueden determinar coordenadas de puntos en pocos segundos. En ocasiones la inicialización es muy rápida y con una fiabilidad muy alta, pero conviene comprobar las coordenadas obtenidas sobre un punto conocido para verificar que la inicialización a sido correcta.

Hasta aquí hemos descrito el funcionamiento del módulo RTK, que como se ha podido ver, está asociado a trabajos de cierta precisión, pero existen otras formas de trabajo en tiempo real. Es cierto que en posicionamientos absolutos, la solución instantánea por navegación la estamos obteniendo en tiempo real.

Otro sistema de trabajos diferenciales en los cuales se pueden obtener resultados en tiempo real es con métodos DGPS. En este caso, se trabajan con observables de código en modo diferencial, donde se pueden obtener precisiones por debajo del metro, muy indicadas para otras aplicaciones. Estos trabajos pueden ser solucionados si disponemos de un módulo RTK, pero también a través de correcciones RTCM o RTCA recibidas de una estación de referencia que calcula y determina nuestra posición en modo diferencial (al contrario que con RTK, que es el móvil el que incorpora el proceso de cálculo) y nos las envía a través de ondas de radio. De este modo, con un equipo de observación, un radiotransmisor/receptor y un contrato de uso, podemos posicionarnos en modo diferencial. Estas emisiones suelen ser realizadas a través de satélites destinados para ello o por repetidores de superficie. Este método de trabajo es, hoy por hoy, uno de los más usados en navegación, apoyos para cartografías de pequeña escala, confección y actualización de GIS, control de volúmenes y superficies, deporte y ocio, etc.

Es evidente que la obtención de resultados en tiempo real es una gran ventaja en todos los trabajos de índole topo-geodésicos, así como en todos los campos donde esté presente el posicionamiento por satélite. Pero quizás, la aplicación donde mayor beneficio representa es en la *topografía y replanteo de obras de ingeniería*.

En la actualidad, los software de los controladores incorporan potentes programas para hallar datos de replanteo en cualquier sistema de referencia. Apoyados en la estación de referencia, podemos replantear cualquier punto en la superficie, ya que obtenemos información en tiempo real de la situación y dirección a seguir desde la referencia deseada (ya sea una base de replanteo, el punto anterior u otro que resulte de interés) para localizar y materializar el punto correspondiente.

Todos los aspectos reseñados dan fuerza a recurrir a estas técnicas cuando el objeto buscado es la **producción rápida y eficaz con buenos resultados**, que es, hoy por hoy, esencial en el desarrollo tecnológico y económico de cualquier ente.

CONSIDERACIONES FINALES.

El Sistema de Posicionamiento por Satélite, ya sea con GPS, GLONASS o GPS/GLONASS, es una herramienta imprescindible en la sociedad de nuestros días, y que los técnicos en todas las materias afectadas deben saber tratar, manipular y ejecutar correctamente, ya que supone, como hemos dicho, un adelanto en la calidad y rendimiento de los trabajos respecto a los métodos clásicos, que nunca se deben abandonar, pero que la evolución de otras técnicas obliga a ir dejando a un lado y recurrir a técnicas, no sólo más modernas, sino más fructíferas y que en un futuro cercano estarán en el idioma y rutina cotidiano de los profesionales de estos campos.

Se citan a continuación las *ventajas* que ofrece el posicionamiento por satélite en nuestro trabajo:

- No es necesaria la intervisibilidad entre estaciones, ya que el sistema de medida es indirecto entre ellas y directo a los satélites. Esto reduce el número de estacionamientos al poder salvar los obstáculos y reduce los errores accidentales y sistemáticos al no tener que realizar punterías ni tantos estacionamientos con intervisibilidad entre los puntos. En definitiva, se reduce el tiempo de observación y los errores que se producen en ella. Debemos añadir además que la observación nocturna es totalmente operativa.
- Al trabajar con ondas de radio, estas no sufren efectos significativos a causa de la niebla, lluvia, fríos y calores extremos, y otros tipos de incidencias.
- El rango de distancias que se pueden alcanzar es mucho mayor, al no ser medidas directas. El mejor de los distanciómetros no supera los 4-5 Km de distancia, además del error que introduce. Con el posicionamiento por satélite podemos medir bases desde unos pocos metros hasta centenas y miles de Km.
- Dado que no se dispone de sistemas ópticos, su fragilidad es menor y su mantenimiento y calibración no es requerido con la frecuencia que lo requieren los instrumentos ópticos. Los costes de mantenimiento por ello son menores.
- El servicio de las señales que ofrecen los sectores espaciales y de control es totalmente gratuito, lo que supone sólo desembolsos en instrumentación de observación, cálculo y gastos para I+D.
- La obtención de los resultados es rápida, máxime si sumamos la obtención de los mismos en tiempo real (RTK). Además, las observaciones y los resultados son interpretables y tienen comprobación.
- La variedad de métodos de posicionamiento hace que sean sistemas apropiados y aptos para cualquier tipo de trabajo.

Por otro lado, los *inconvenientes* más relevantes son :

- No puede ser utilizado en obras subterráneas y a cielo cerrado.
- Tiene dificultades de uso en zonas urbanas, cerradas, con altos edificios y zonas arboladas y boscosas, debido a las continuas pérdidas de la señal de los satélites. Este problema, no obstante, se está solucionando, y de forma satisfactoria, con el uso combinado de las constelaciones GPS y GLONASS para mantener siempre cinco o más satélites sobre el horizonte.
- El desconocimiento del sistema. El sistema de posicionamiento por satélite es una gran herramienta, y de fácil uso, pero ello no lleva consigo eximirse de su conocimiento y del tratamiento de sus observables correctamente, ya que de lo contrario, se pueden obtener resultados poco satisfactorios en precisión y rendimiento.

Hoy por hoy, podemos enumerar los siguientes campos en los que el Sistema de Posicionamiento por Satélite está presente :

*** GEODESIA.**

- . Determinación de las Redes fundamentales para la Cartografía, Topografía, Ingeniería y control de un país, región o localidad.
- . Obtención de la ondulación del Geoide de forma regional o global.

*** GEOFÍSICA.**

- . Estudio de deformaciones de la superficie terrestre.
- . Determinación de la estructura de las distintas capas de la Atmósfera y comportamiento de las mismas.

*** TOPOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA.**

- . Densificación de Redes Geodésicas.
- . Levantamientos taquimétricos.
- . Apoyo fotogramétrico.
- . Determinación de las coordenadas del centro óptico de la cámara en el momento de la toma.

*** INGENIERÍA.**

- . Redes fundamentales para cartografías donde se apoyen los proyectos de arquitectura o infraestructuras de todo tipo.
- . Establecimiento de Redes básicas para el replanteo de una obra de ingeniería.
- . Replanteo de puntos de un proyecto de ingeniería.
- . Control de calidad en obra.
- . Control de deformaciones de estructuras.

*** HIDROGRAFÍA.**

- . Levantamientos batimétricos.
- . Estudios y análisis de la evolución de las cuencas hidrográficas.
- . Determinación de itinerarios fluviales y marítimos.

*** SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

- . Obtención de los datos geográficos para la formación y actualización de bases de datos georeferenciadas y la cartografía de un Sistema de Información Geográfica.

*** NAVEGACIÓN.**

- . Situación instantánea de vehículos sobre un sistema de referencia.
- . Actualización de cartas de navegación.
- . Determinación de itinerarios idóneos.
- . Deducción de la evolución e itinerario de un vehículo en movimiento.
- . Inventarios de redes viales, fluviales, aéreas, navales y espaciales.

*** DEFENSA.**

- . Localización de objetivos de cualquier tipo.
- . Evaluación de zonas y recorridos por las mismas.

*** OCIO Y DEPORTE.**

- . Localización y situación en expediciones, safaris, rallies, viajes, competiciones, excursiones en zonas de cartografía desconocida, etc.

A continuación, vamos a describir las etapas y parámetros fundamentales que se deben seguir en todo posicionamiento por satélite donde se requiera precisión y rendimiento en el trabajo. Las etapas son fundamentalmente tres : *planificación, observación y cálculo.*

1. PLANIFICACIÓN.

Es conveniente, para evitar pérdidas de tiempo en repeticiones de puestas y variaciones de planes, realizar una buena planificación de las observaciones y determinar cuál es la hora del día donde hay un mayor número de satélites, así como cuándo la geometría de la observación es más idónea, además de determinar el estado de salud de los satélites.

Para llevar a cabo esta etapa, los software para el post-proceso incorporan módulos de planificación, los cuales, a través de los almanaques radiodifundidos de las constelaciones, que podemos ir almacenando periódicamente o los almanaques ya existentes, y de las posiciones de los lugares de observación, podemos conocer el número de satélites, salud, bondad de la geometría de la observación, periodo óptimo de observación, etc. Podemos, además marcar la obstrucciones que puedan existir en el lugar de la observación. Esto se puede realizar para cualquier lugar del planeta durante las 24 horas del día.

2. OBSERVACIÓN.

Una vez decidido el lugar, el día y la hora de la observación, debemos elegir el método de posicionamiento adecuado en función del tipo de trabajo a realizar y de sus precisiones.

Una vez en el campo, debemos introducir en la unidad de control del receptor los parámetros de la observación, entre los que destacan como más importantes :

- Método de posicionamiento para que el software del receptor almacene correctamente los datos.
- Máscara de elevación. Se recomienda no usar máscaras inferiores a 10° sexagesimales. Debemos tener en cuenta que en la etapa de observación podemos usar máscaras amplias, y que luego en la etapa de cálculo las podemos reducir, es decir aumentar el ángulo de elevación, si lo consideramos oportuno.
- Establecimiento del intervalo de grabación en segundos (épocas). Cada época va a ser un tiempo de grabación de datos. Se pueden elegir y establecer en múltiplos de 60, es decir, épocas de 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, etc, segundos. Hay que tener en cuenta que a menor valor de época, mayor cantidad de datos almacenados en la tarjeta, y por lo tanto, se deberá elegir un menor tiempo de puesta de observación para no agotar su capacidad. A modo de ejemplo, se puede decir que 15 minutos de observación grabando épocas cada 5 segundos equivale a 45 minutos grabando épocas cada 15 segundos, ya que la cantidad de información grabada y la capacidad agotada de almacenamiento de la tarjeta es prácticamente la misma, en función del número de satélites y de la cantidad de observables que se recojan en la observación. Existen instrumentos que son capaces de grabar la información en modo compacto, es decir, utilizan toda la

información disponible entre una época de grabación y la siguiente, en lugar de grabar sólo la información del instante en el que se materializa la época.

3. CÁLCULO.

En primer lugar se debe proceder a insertar los datos de las observaciones en el software. En el caso de trabajar en tiempo real, esto lo realiza la propia unidad de control. Así mismo, se deben comprobar todos los datos y atributos referentes a cada punto, tales como nombres, alturas de antena, etc.

A continuación, se procede a calcular un punto singular o single point de todos los puntos que hayan constituido una estación en el trabajo.

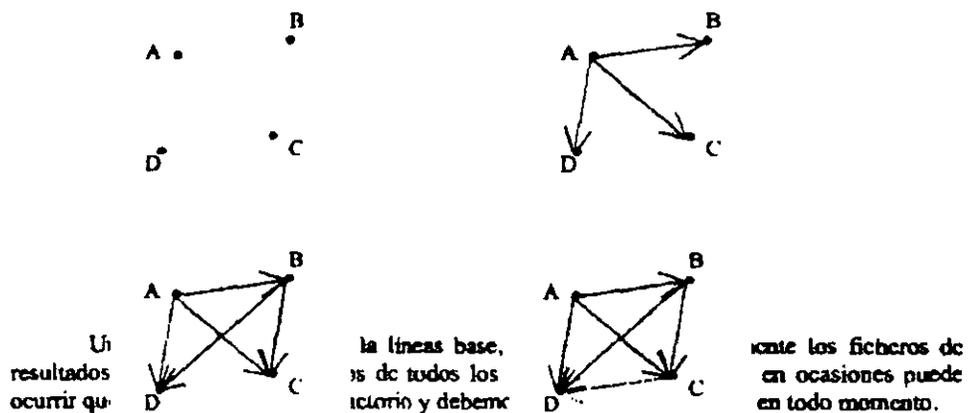
El siguiente paso es determinar los parámetros correctos y apropiados para el cálculo de las líneas base, es decir :

- . Máscara de elevación.
- . Corrección ionosférica y troposférica.
- . Tipo de efemérides usadas.
- . Combinación de observables a utilizar.
- . Parámetros estadísticos de errores máximos tolerables (ratio, pérdidas de ciclo, señal/ruido, satélite de referencia, etc. ...)

Seguidamente, se procede al cálculo de las líneas base de una manera ordenada, es decir, siguiendo algún criterio, como puede ser aquel de calcular todas las líneas base que lleguen a un mismo punto antes de tomar éste como referencia para calcular otras líneas base, o algún otro criterio que se estime adecuado.

Es importante que una línea base nunca debe ser calculada en las dos direcciones con los mismos datos de observación, ya supondría incluir líneas linealmente dependientes en el sistema.

Un criterio de cálculo puede ser el representado las siguientes figuras :



Una vez calculadas todas la líneas base, se deben revisar totalmente los ficheros de resultados, así como los resultados de todos los test estadísticos, ya que en ocasiones puede ocurrir que el cálculo no sea satisfactorio y debemos ser conscientes de ello en todo momento.

Tras el cálculo satisfactorio de las líneas base, el siguiente paso es realizar el ajuste de la figura formada por todas las líneas base calculadas. Los paquetes de software incorporan un módulo de ajuste que utilizan la técnica de mínimos cuadrados y donde el usuario debe seleccionar una serie de parámetros para realizar el ajuste como son :

- . El número de iteraciones
- . Parámetros estadísticos del test de detección de errores groseros.
- . Pesos de las observaciones, etc.

Finalmente, una vez obtenidas las coordenadas ajustadas de todos los puntos, puede ser necesario realizar una transformación de coordenadas para pasar los puntos al sistema de coordenadas locales. Para ello, los paquetes de software disponen de un módulo de transformación de coordenadas, en donde, a partir de una serie de puntos con coordenadas en los dos sistemas se calculan los parámetros de transformación de un sistema a otro por mínimos cuadrados, parámetros que se aplican al resto de los puntos para transformarlos al sistema local.

Para realizar la transformación debemos elegir el elipsoide al que queremos referir las coordenadas, la proyección y la zona que determinan ese sistema local.

Una vez que ya tenemos las coordenadas de todos los puntos en el sistema de coordenadas locales, queda finalizada la etapa del cálculo.



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

"Tres décadas de orgullosa excelencia" 1971 - 2001

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO DE EDUCACIÓN EN
LÍNEA
(CIDEL)**

**CURSO
GEODESIA**

CV131

DEL 26 AL 30 DE SEPTIEMBRE DEL 2005

**Instructores:
Ing. Germán García González**

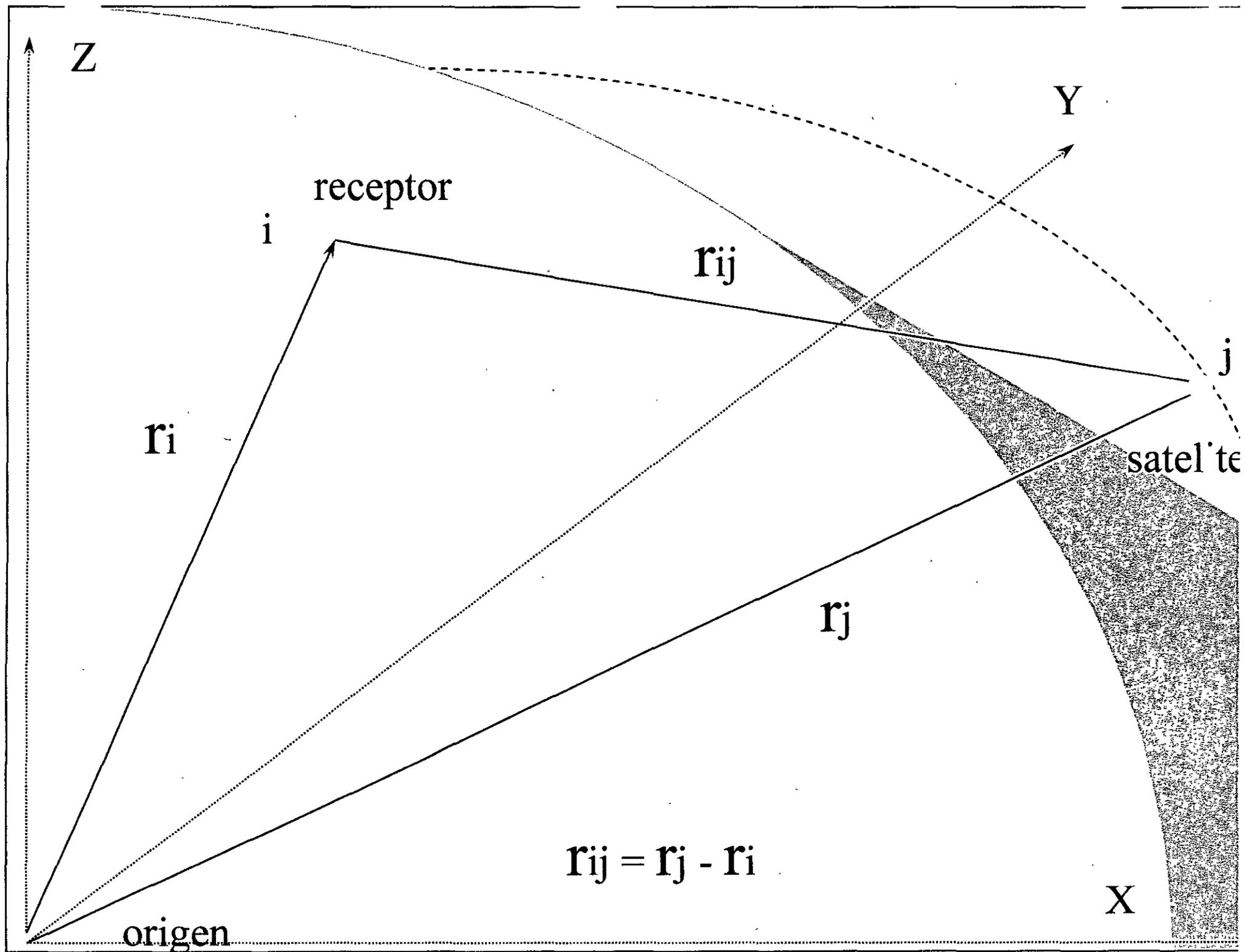
COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

GEODESIA

La ciencia que estudia la forma y dimensiones de la tierra así como la determinación de su campo de gravedad

GEODESIA

- Marco de referencia para todos los levantamientos geodesicos de Mexico
- Un conjunto de estaciones terrestres
- Un juego de coordenadas cartesianas
- Un elipsoide geometrico de referencia
- Datum geodésico global



Z

Y

receptor

i

r_{ij}

j

r_i

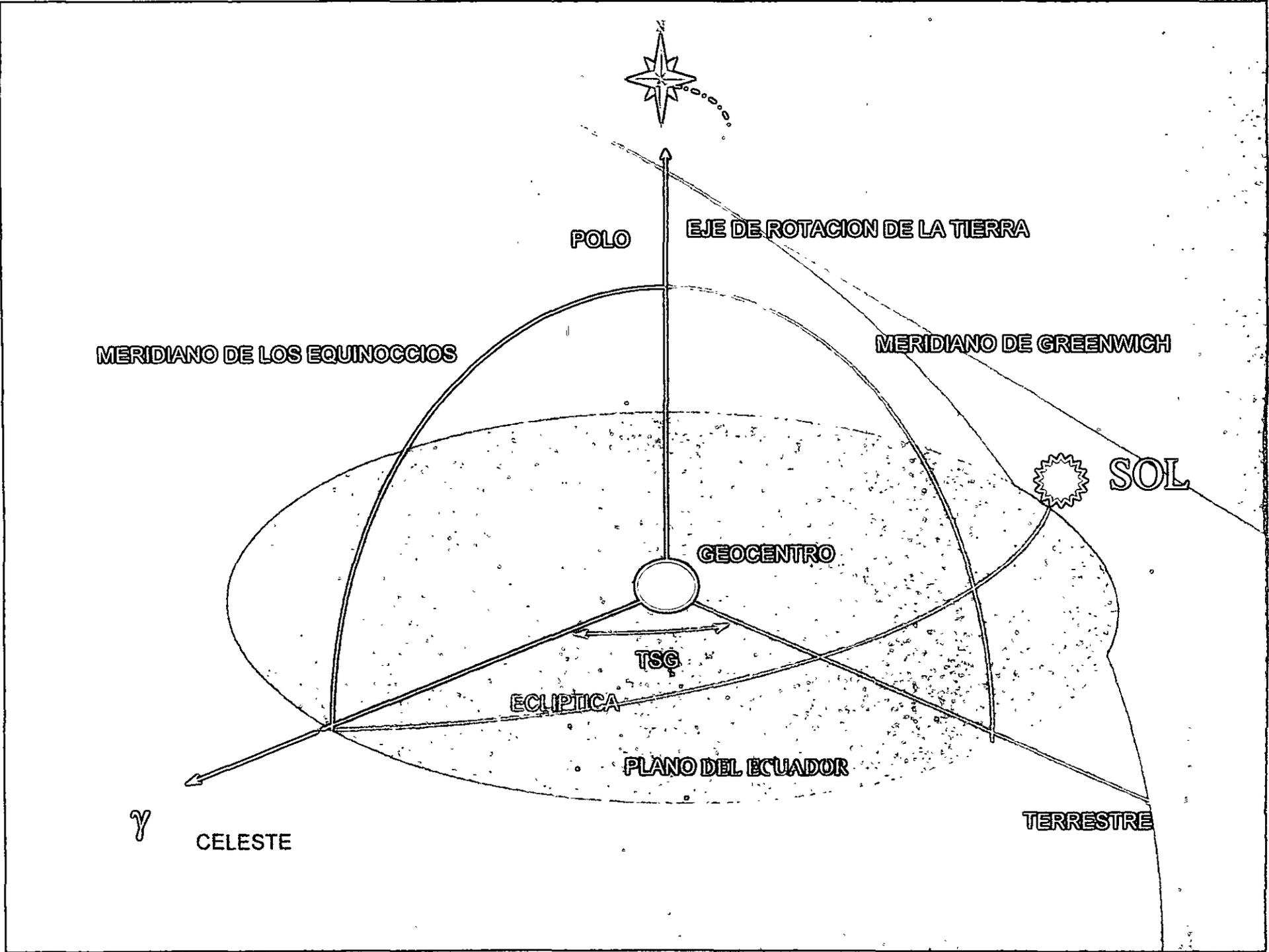
satélite

r_j

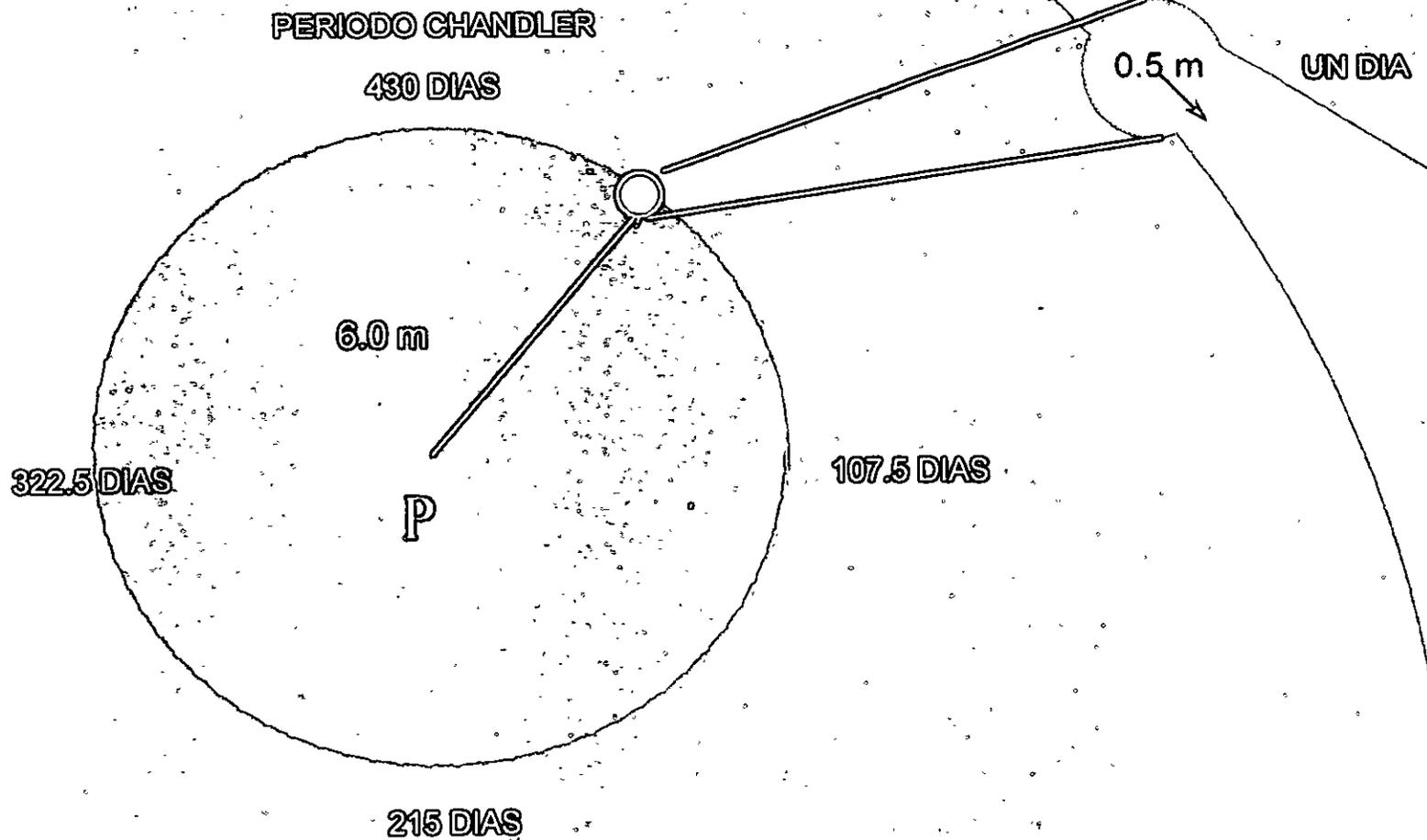
$$r_{ij} = r_j - r_i$$

origen

X



MOVIMIENTO POLAR



POLO CONVENCIONAL

Unión Internacional de Geodesia y Geofísica

IUGG

Asociación Internacional de Geodesia

IAG

Union Internacional Astronomica

IAU

Origen Internacional Convencional), 1900 - 1905

CIO

El Servicio Internacional del Movimiento Polar

IPMS

Oficina Internacional de la Hora

BIH

Polo Terrestre Convencional), 1987

CTP

Servicio Internacional de Rotación de la Tierra

IERS

DEFINICION DEL GRS80

PARAMETROS Y VALOR

DESCRIPCIÓN

a 6378137 m

Semieje mayor del elipsoide.

J₂ 108263 x 10⁻⁸

Factor dinámico de la tierra

ω_e 7292115 x 10⁻¹¹rad/s

Velocidad angular de la Tierra.

GM 3.986005 x 10⁸m³/s²

Constante gravitacional .

PARAMETROS DERIVADOS

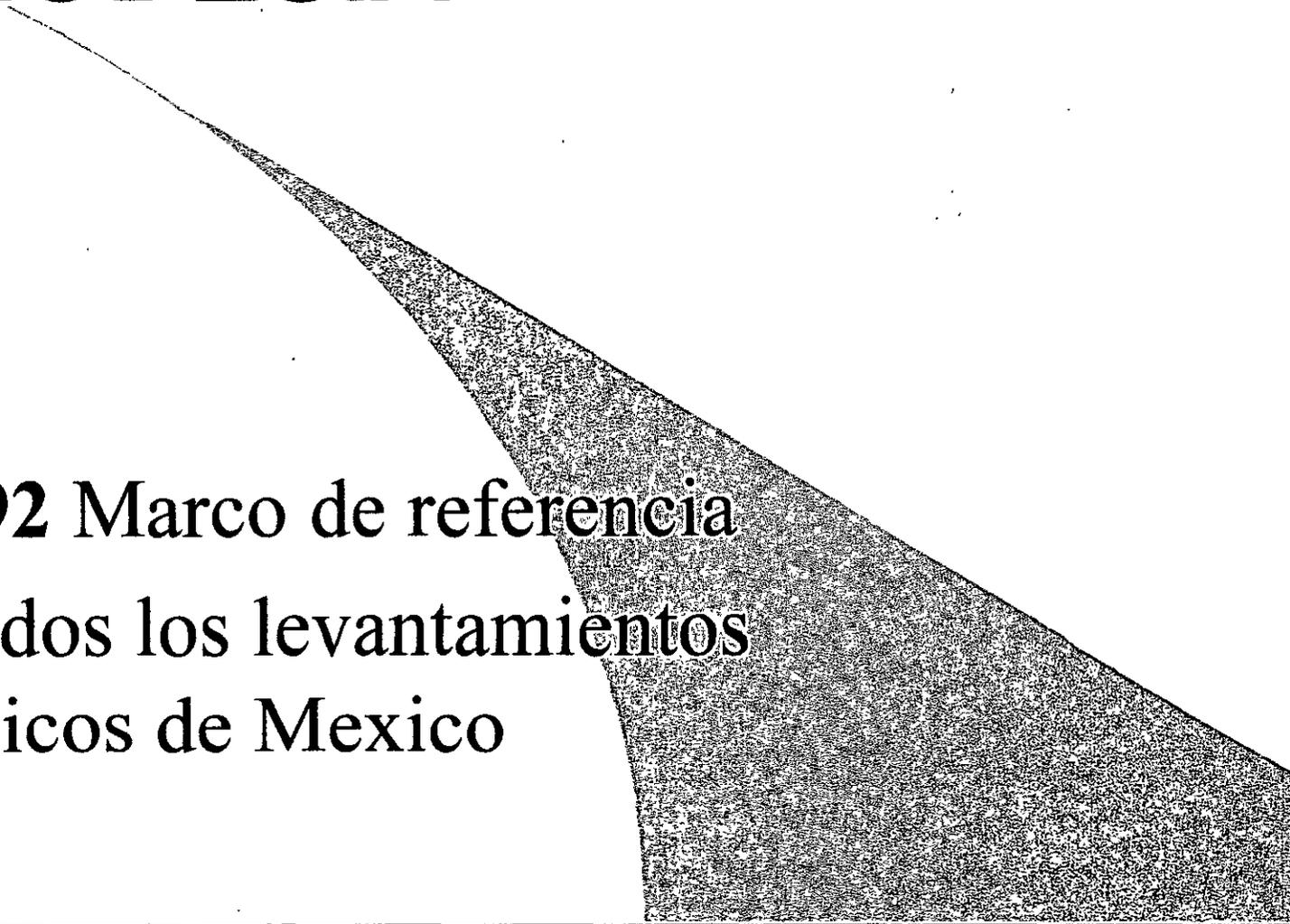
PARAMETROS Y VALOR

DESCRIPCIÓN

b	6356753.3141 m	Semieje menor del elipsoide.
E	521854.0097	Excentricidad lineal
C	6399593.6259 m	Radio polar
e ²	0.0066943800229	Primera excentricidad al cuadrado
e' ²	0.00673949677548	Segunda excentricidad al cuadrado
f	0.00335281068118	Achatamiento
1/f	298.257222101	Recíproco del achatamiento
Q	10001965.7293 m	Cuadrante de meridiano
R1	6371008.7714 m	Radio medio
R2	6371007.1810 m	Radio de la esfera de igual sup.
R3	6371000.7900 m	Radio de la esfera de igual vol.

MARCO DE REFERENCIA EN GEODESIA

ITRF92 Marco de referencia
para todos los levantamientos
geodesicos de Mexico



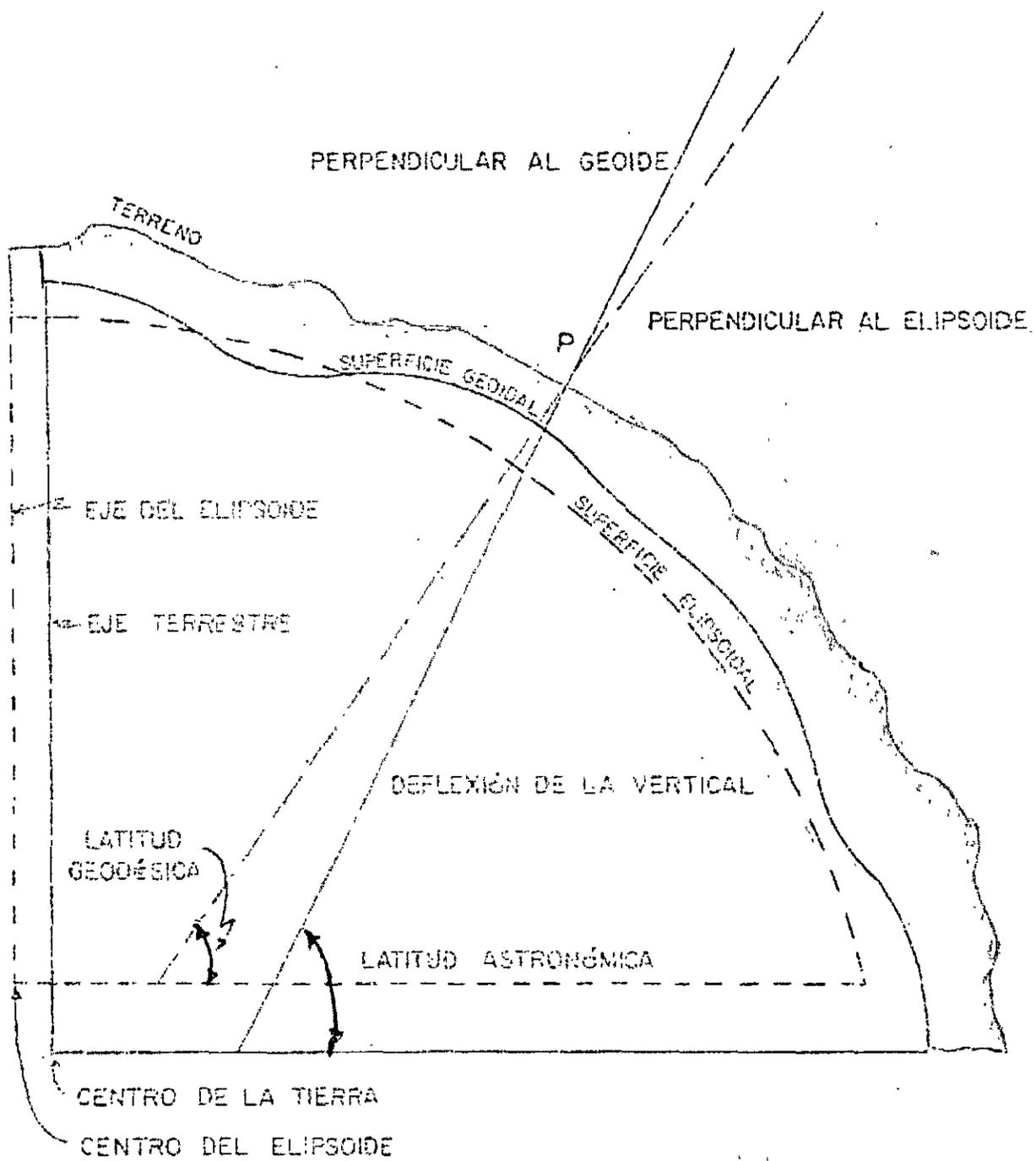
SISTEMAS Y MARCOS

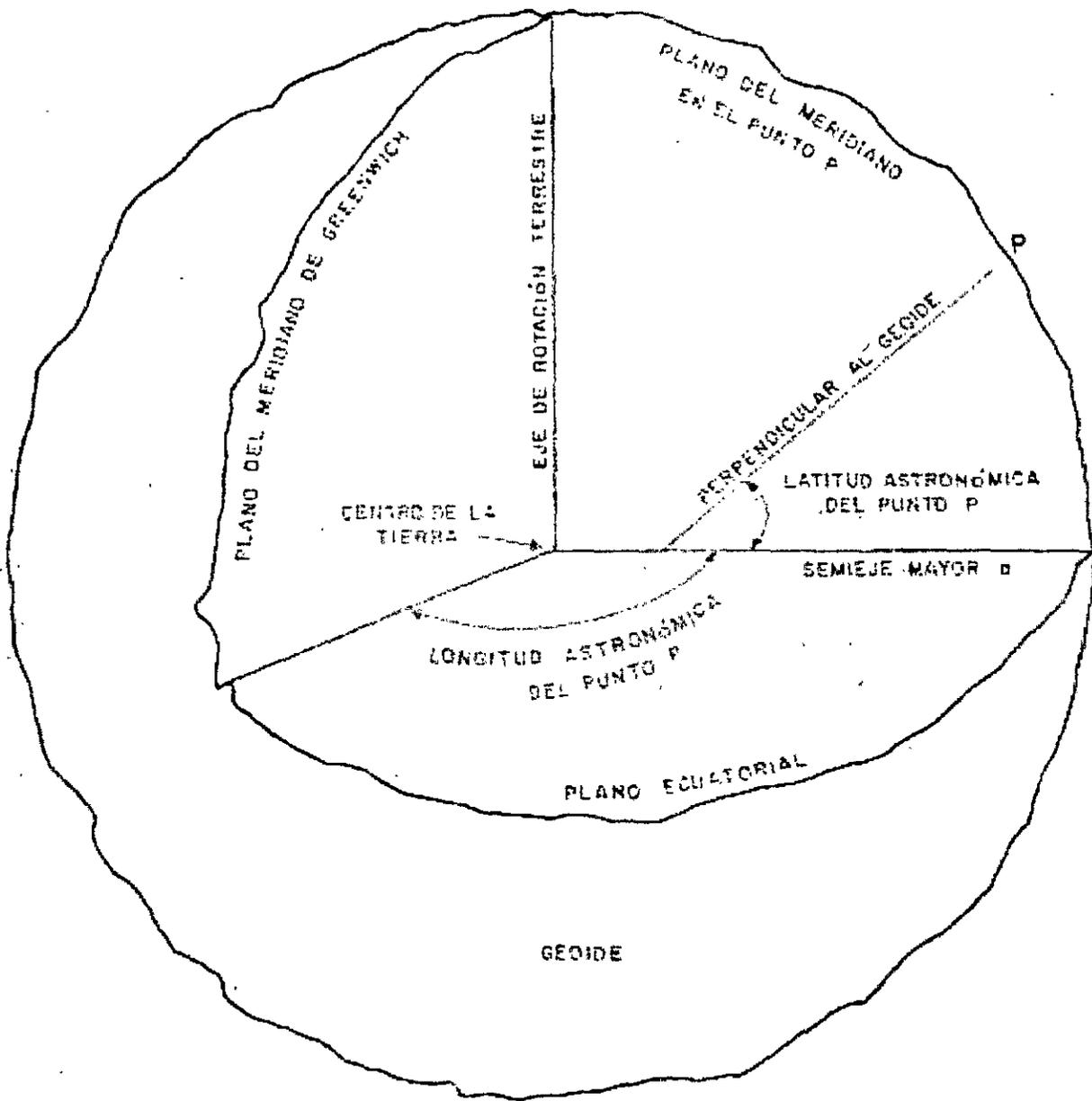
○ SISTEMA DE REFERENCIA

- Un sistema de coordenadas
- Un elipsoide equipotencial
- Un modelo gravitacional
- Parámetros y constantes físicas

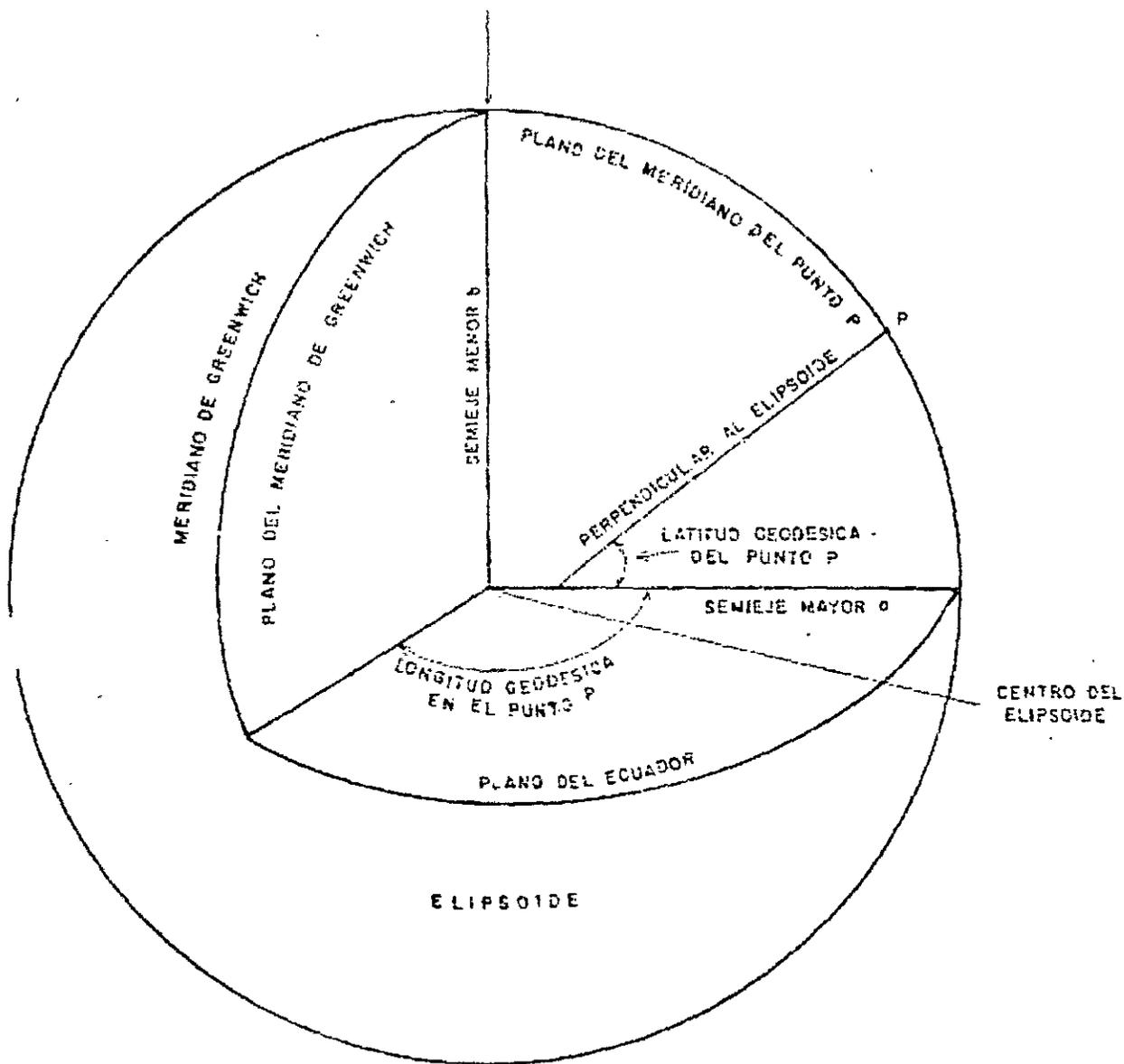
○ MARCO DE REFERENCIA

- Un conjunto de estaciones terrestres
- Un juego de coordenadas cartesianas
- Un elipsoide geométrico de referencia

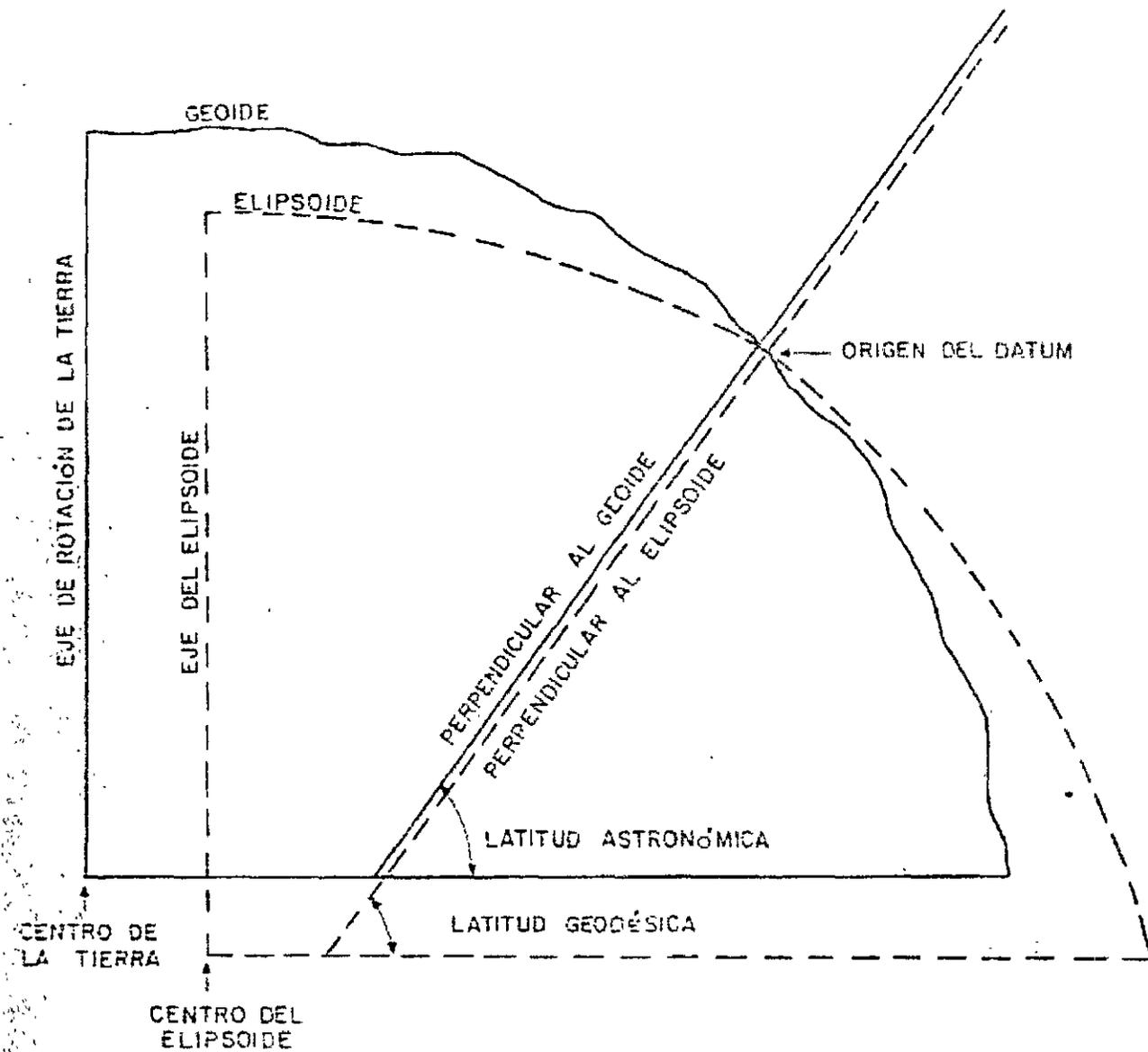




EJE DE ROTACIÓN
DEL ELIPSOIDE

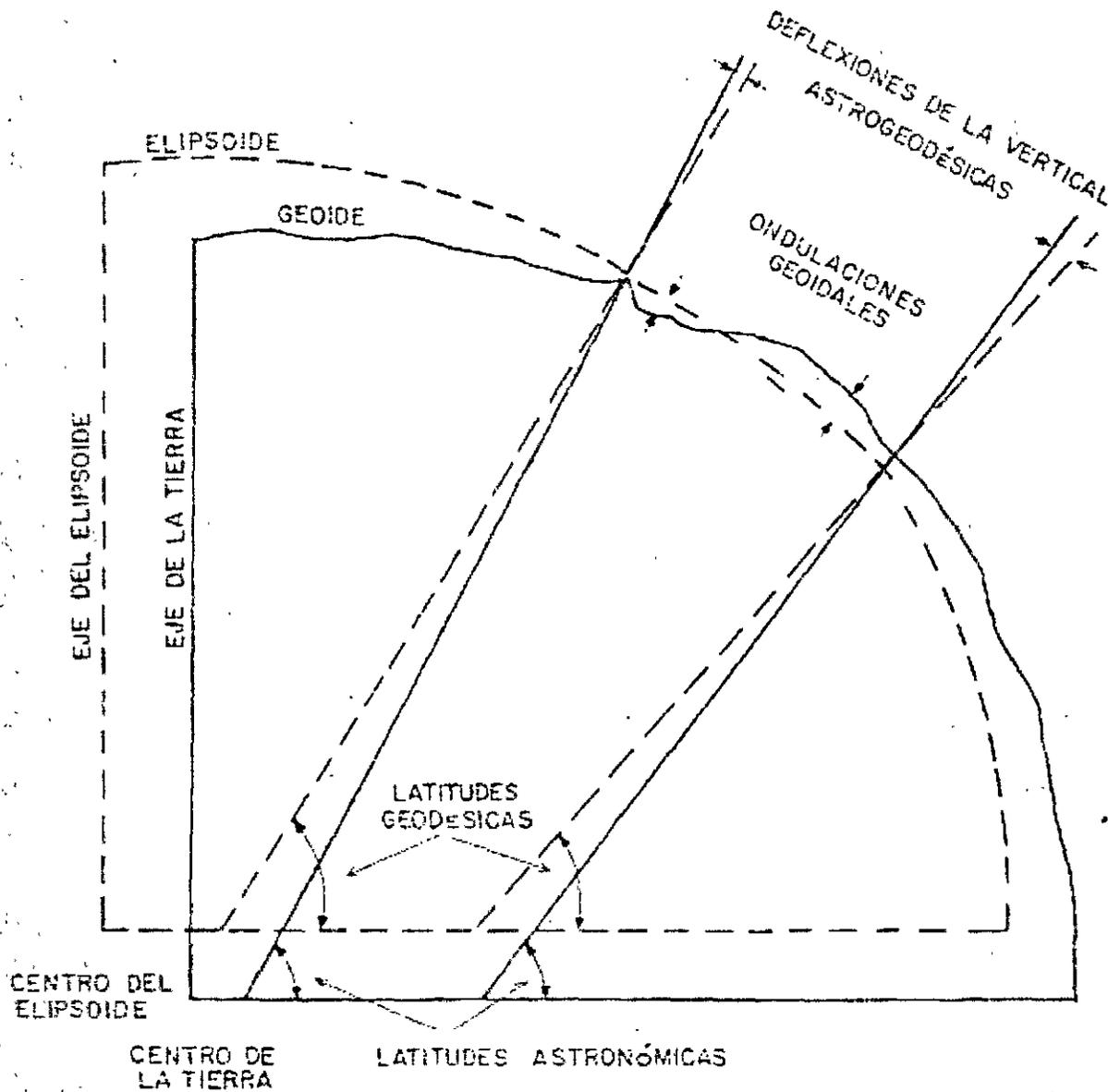


(EN EL PUNTO ORIGEN DEL DATUM LA PERPENDICULAR AL ELIPSOIDE SE HACE —
COINCIDIR CON LA PERPENDICULAR AL GEOIDE)

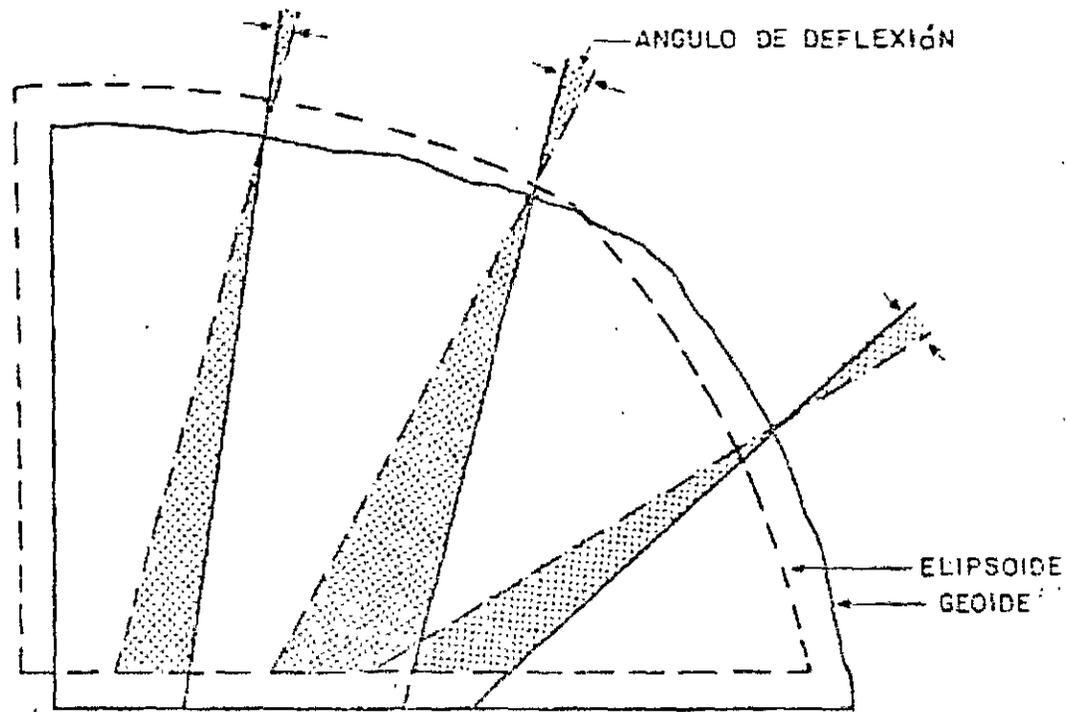
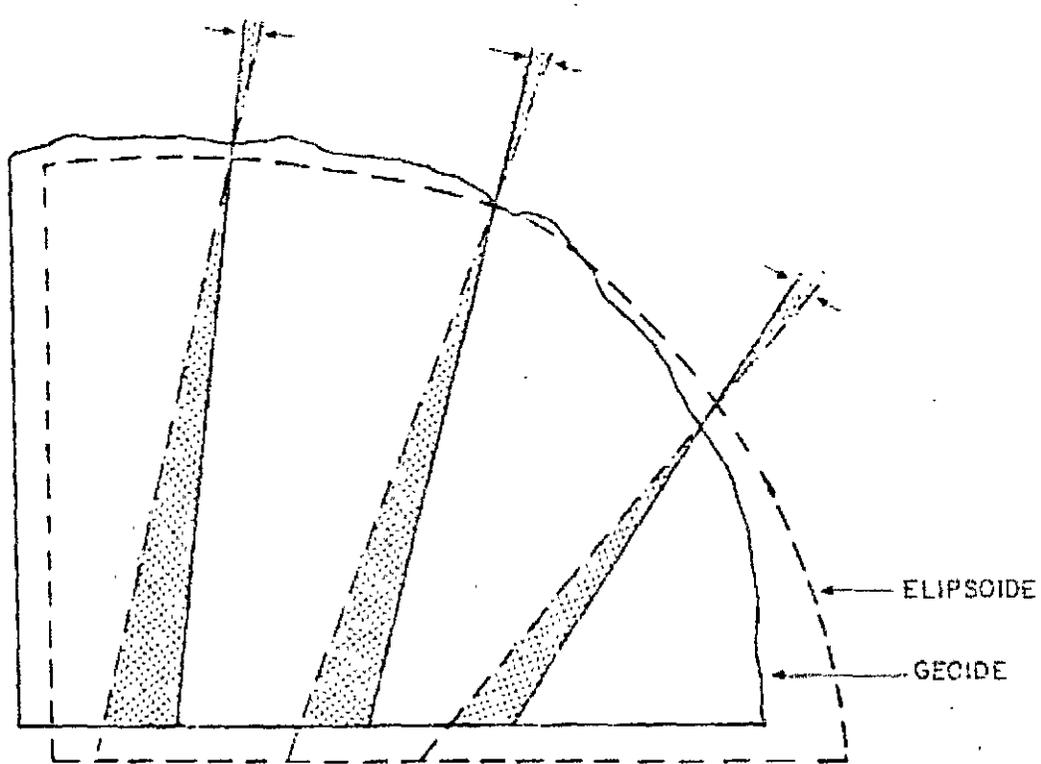


ORIENTACIÓN DEL CENTRO DEL ELIPSOIDE CON RESPECTO
AL CENTRO DE LA TIERRA

EL GEOIDE Y EL ELIPSOIDE SE ORIENTAN DE TAL MODO QUE LA SUMA DEL CUADRADO DE DIVERSAS DEFLEXIONES DE LA VERTICAL, SELECCIONADAS A TRAVÉS DE TODA LA RED GEODÉSICA SEA TAN PEQUEÑA COMO SEA POSIBLE.



ORIENTACIÓN DEL CENTRO DEL ELIPSOIDE CON RESPECTO AL CENTRO DE LA TIERRA



NÓTESE QUE UN CAMBIO EN LA ORIENTACION DEL ELIPSOIDE CAMBIA LA MAGNITUD DE LAS DEFLEXIONES ASTROGEODÉSICAS

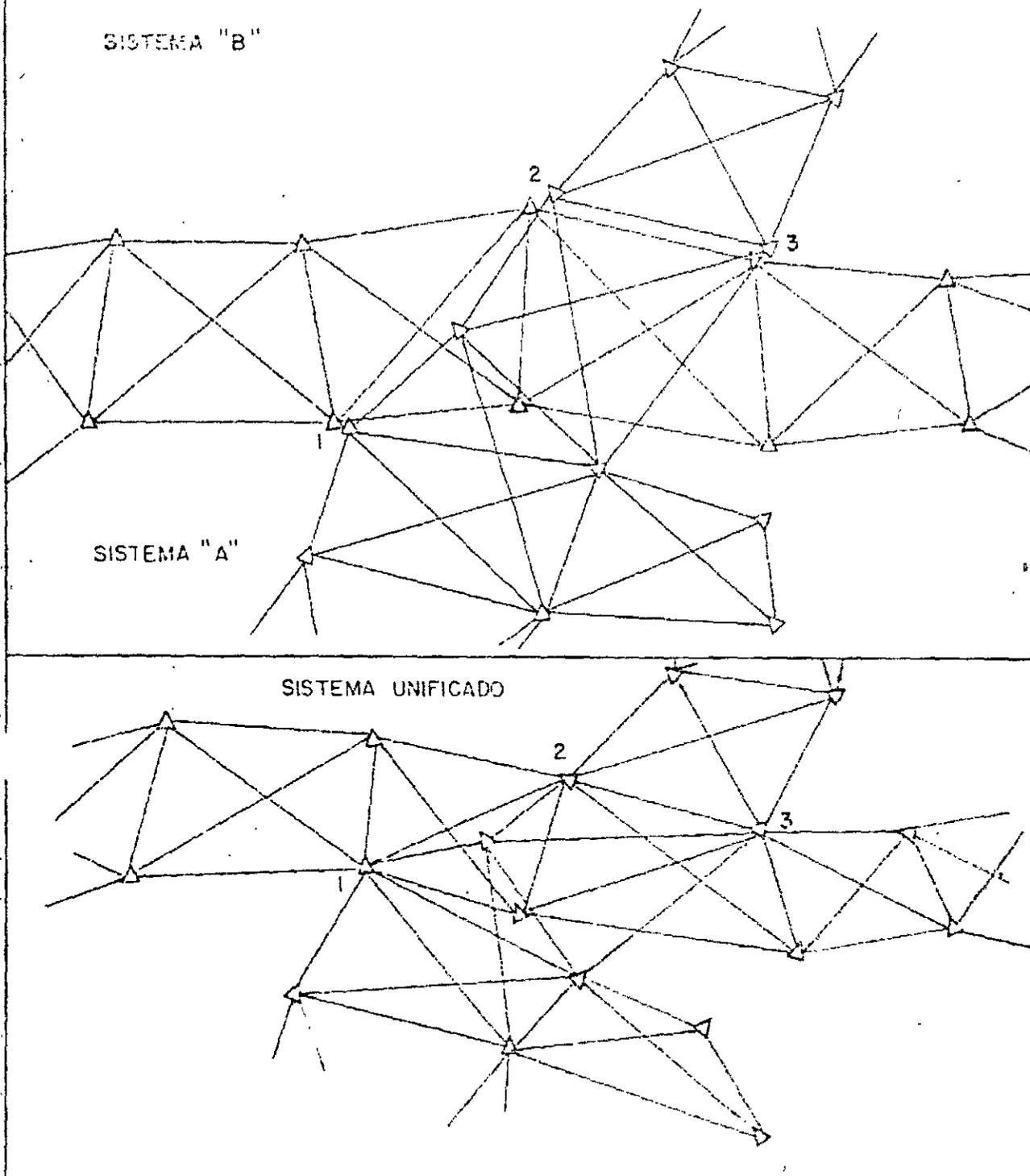
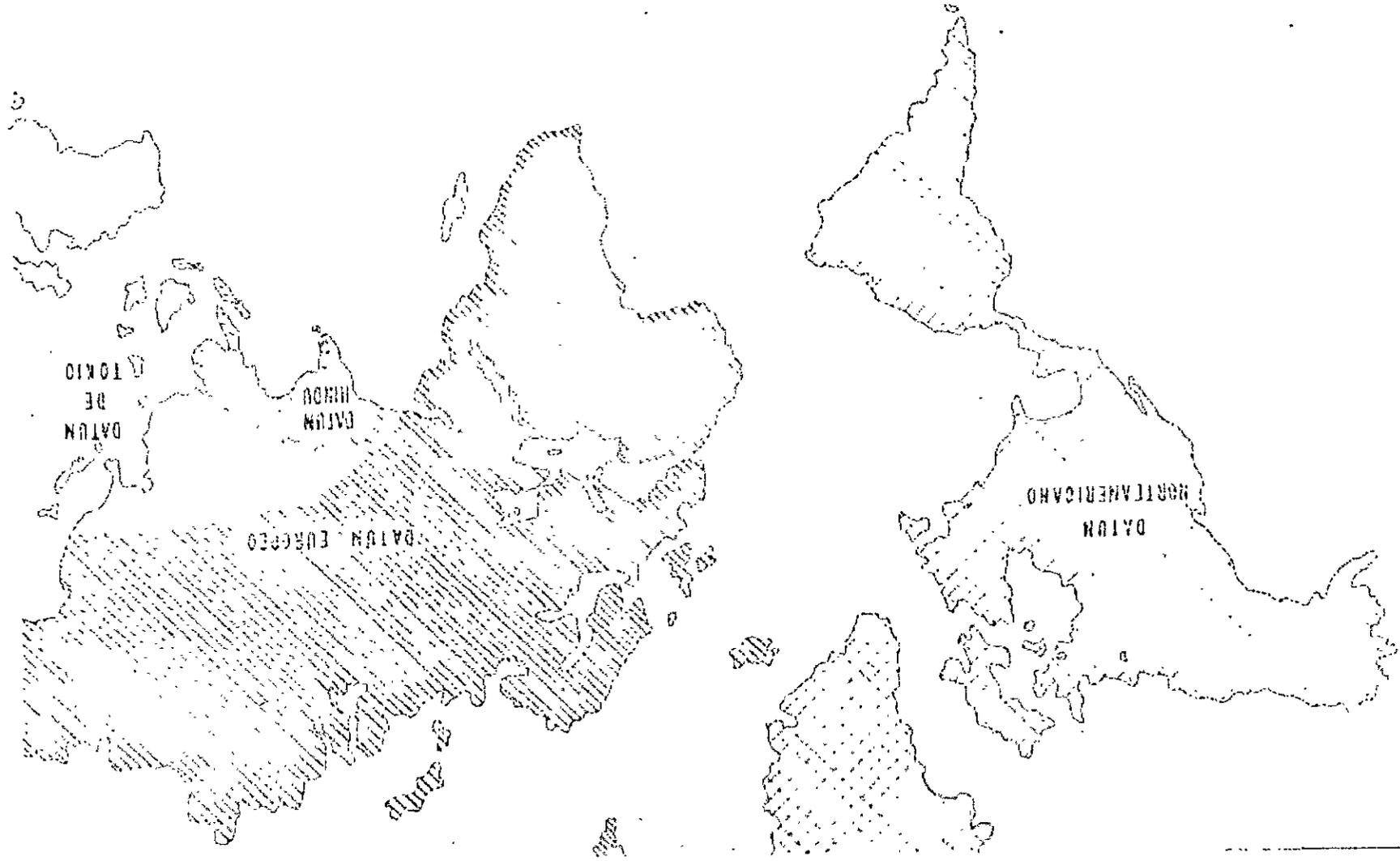
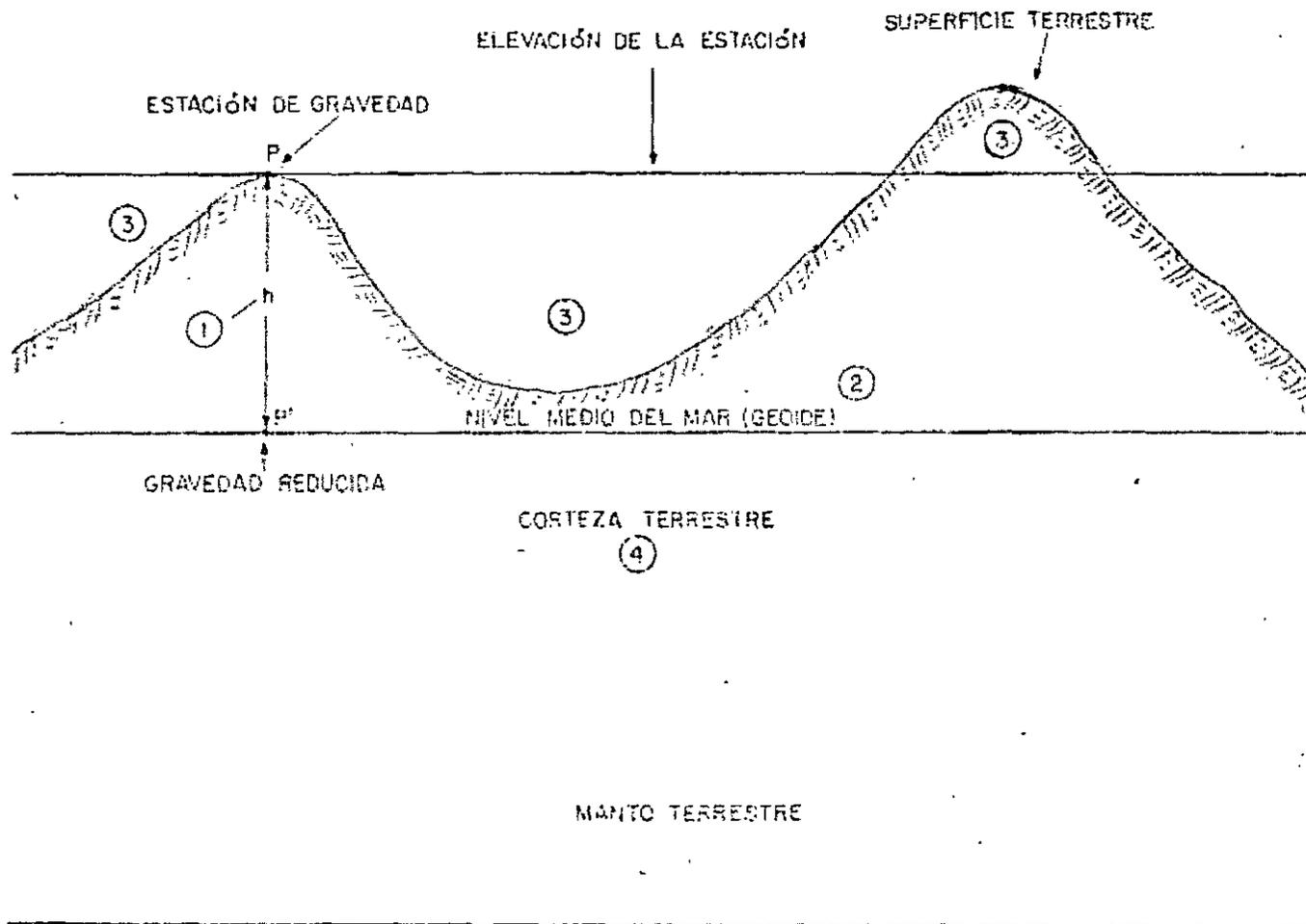


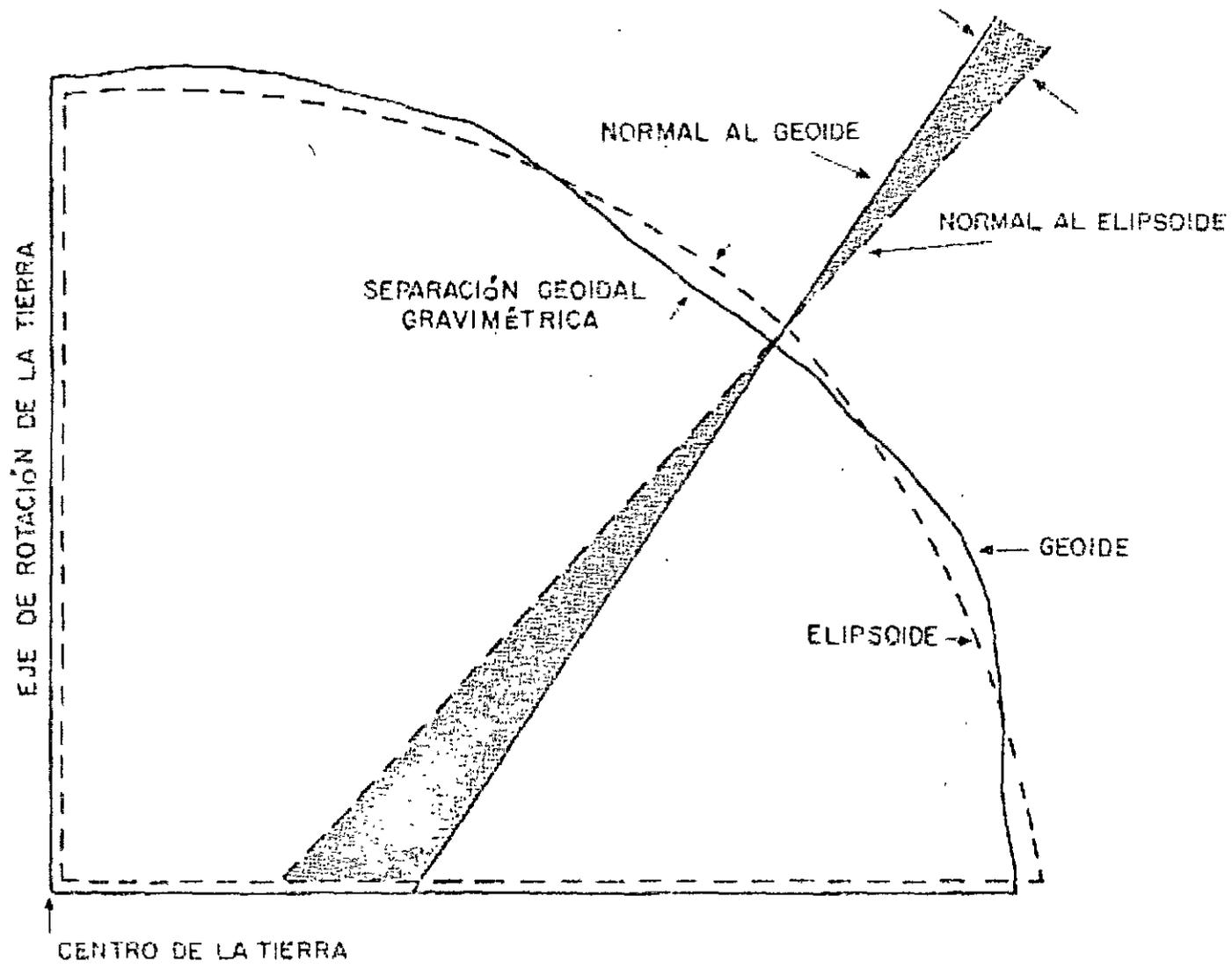
Fig.17 SISTEMAS DE TRIANGULACIÓN TRASLAPADOS PUEDEN UNIRSE
 POR "REDUCCIÓN DE DATUM"



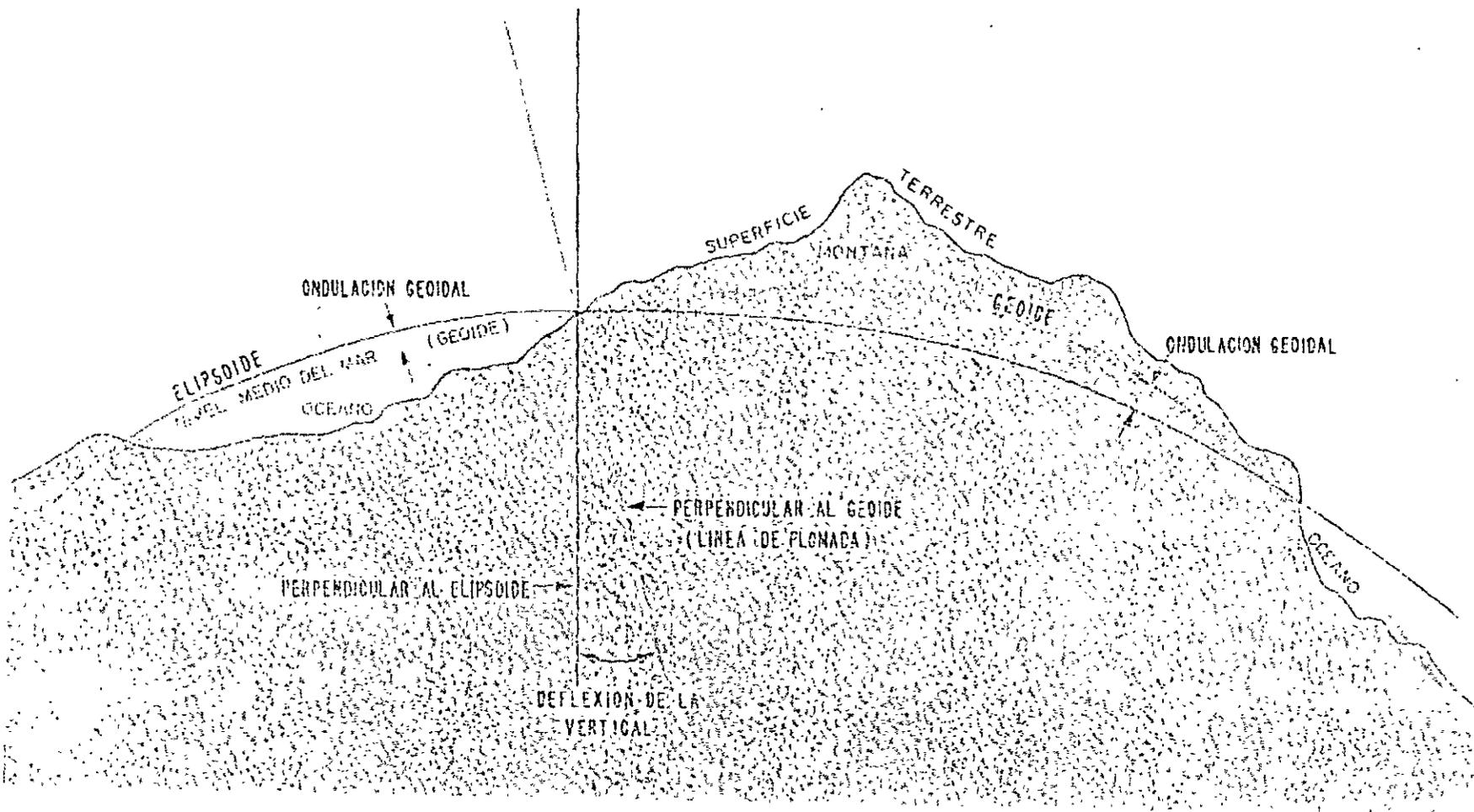


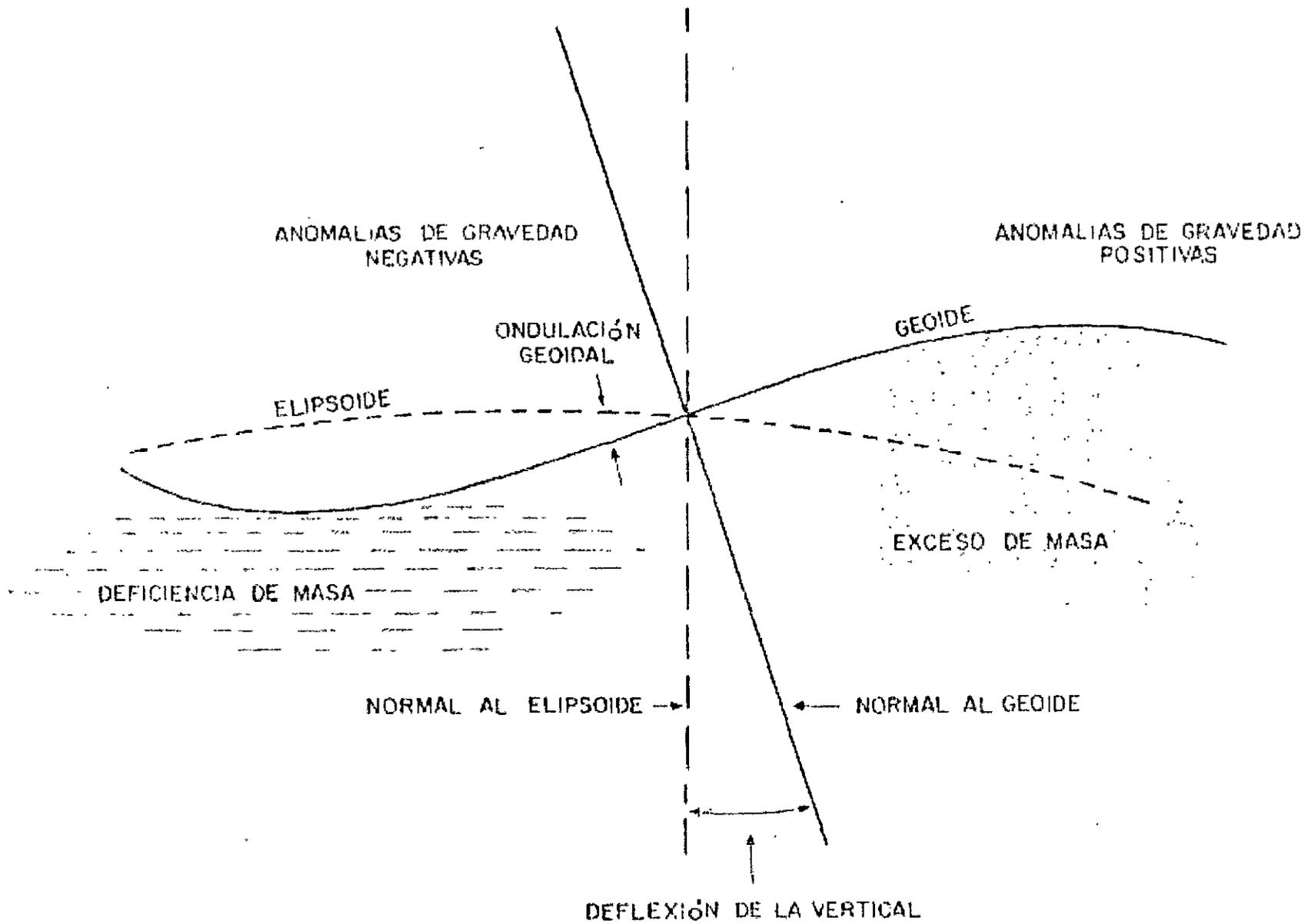
- 1.- ELEVACIÓN, h , DEL PUNTO DE OBSERVACIÓN
- 2.- MASA ENTRE LA ELEVACIÓN DE LA ESTACIÓN Y EL NIVEL DEL MAR
- 3.- EFECTOS DEL TERRENO
- 4.- ESTRUCTURA GENERALIZADA, DE LA CORTEZA TERRESTRE

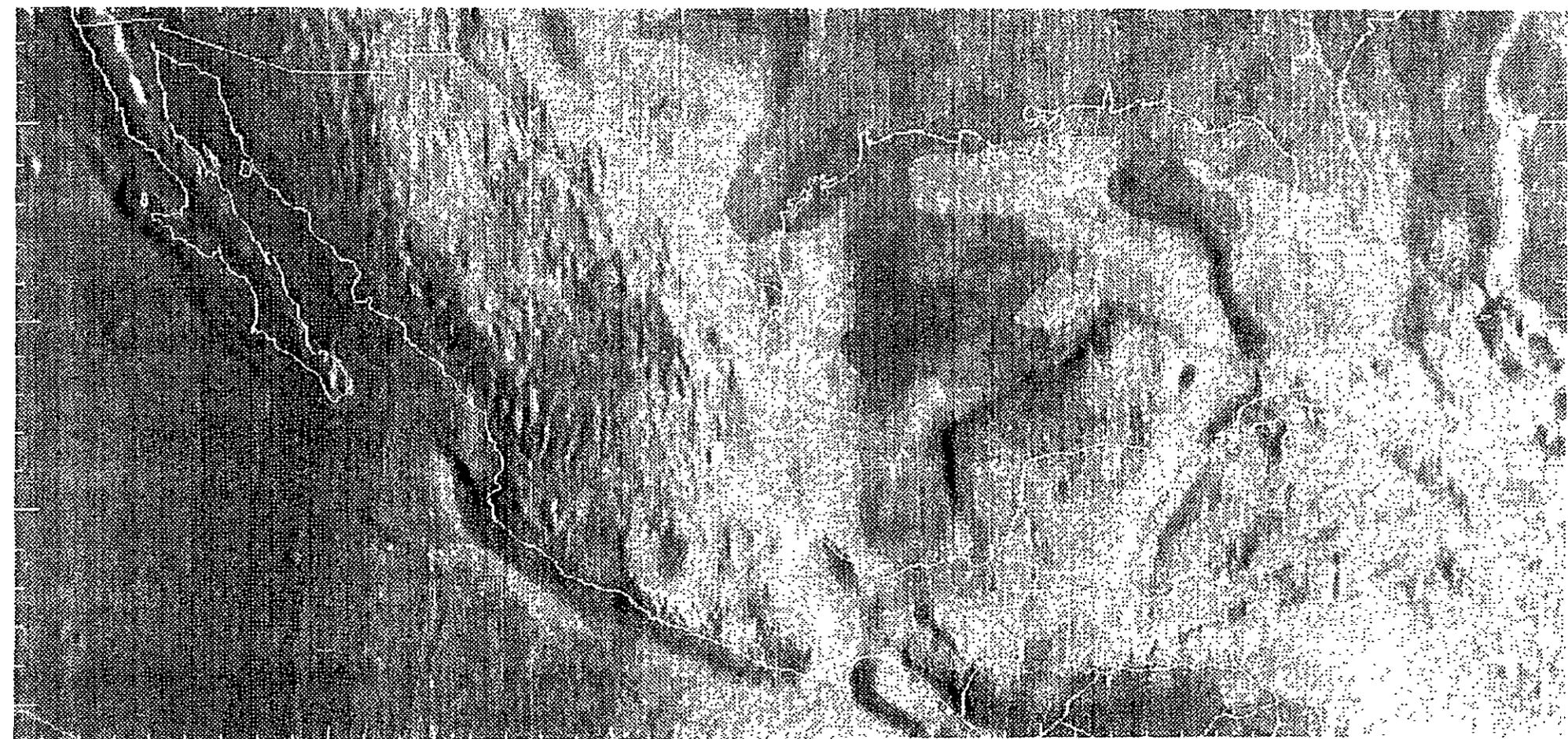
DEFLEXIÓN DE LA VERTICAL
GRAVIMÉTRICA



(Efectos por la distribución Irregular de la
masa en la corteza terrestre)





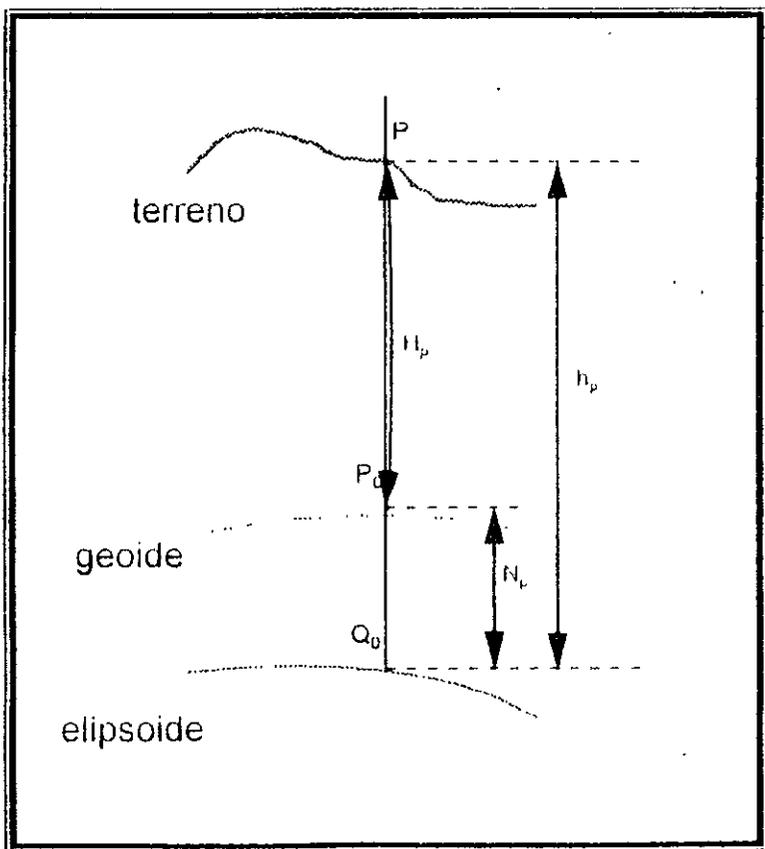


Proyecto

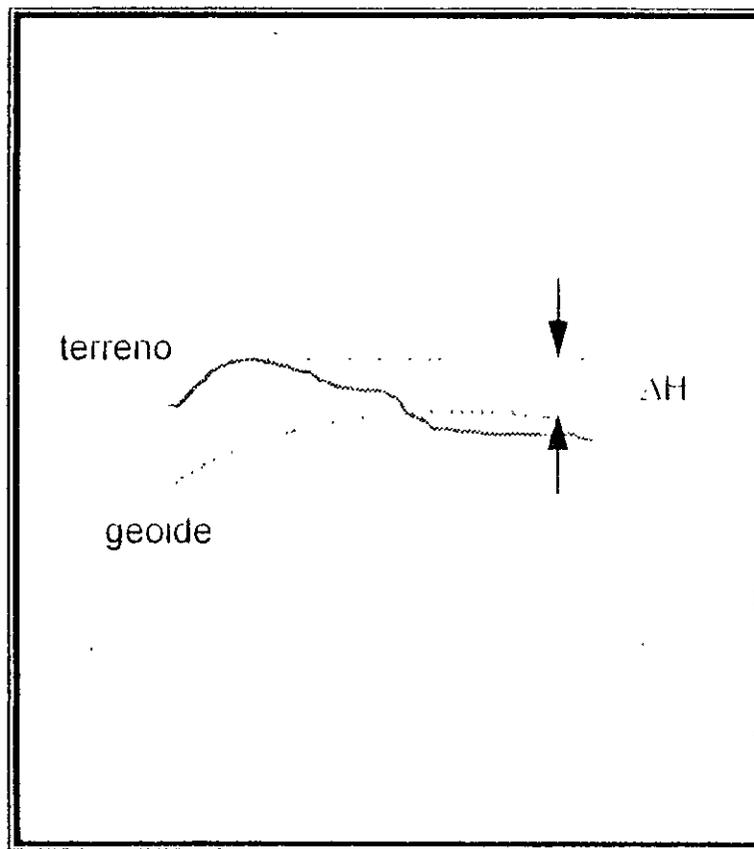
para refinar la solución geoidal en

el área mexicana

INTRODUCCION

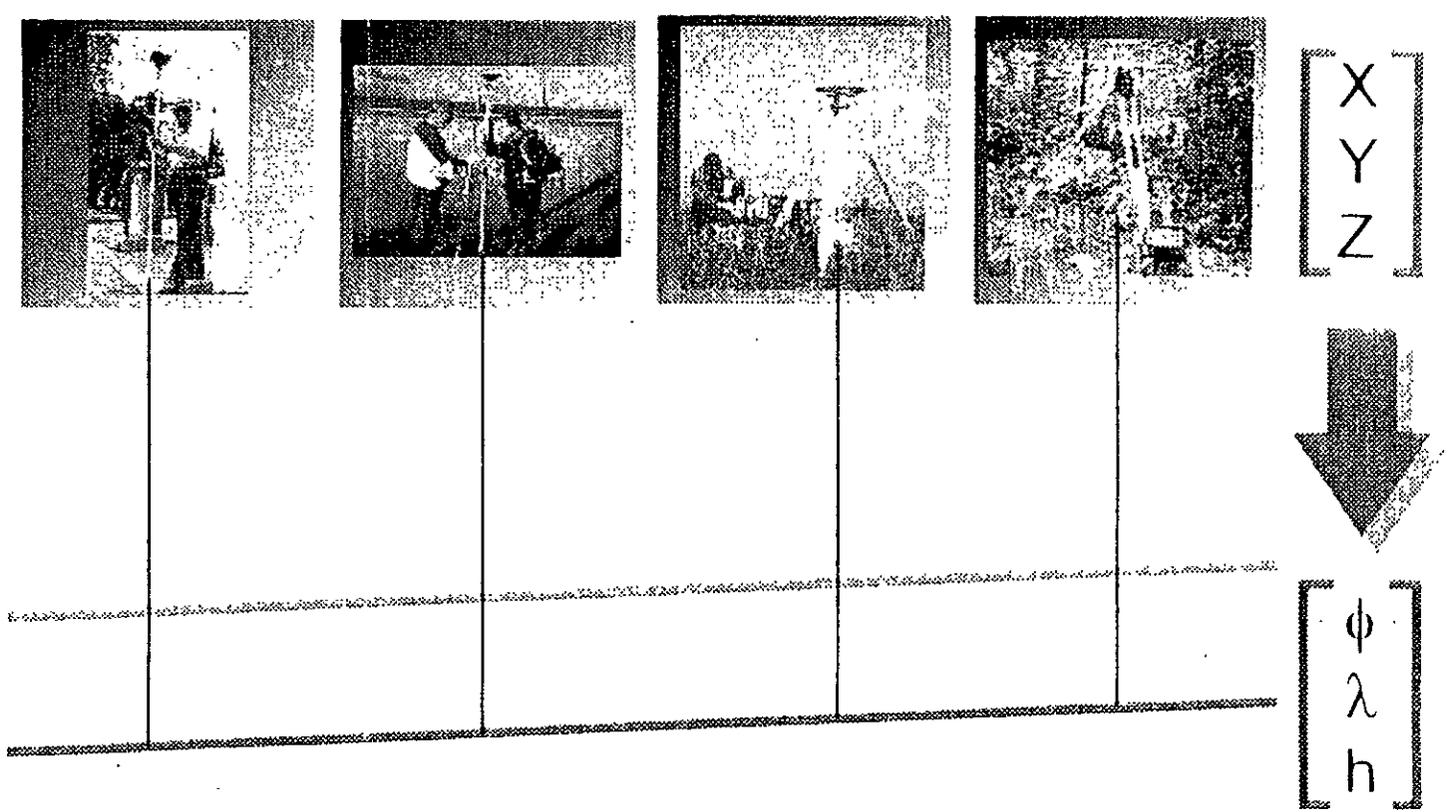


LIGA



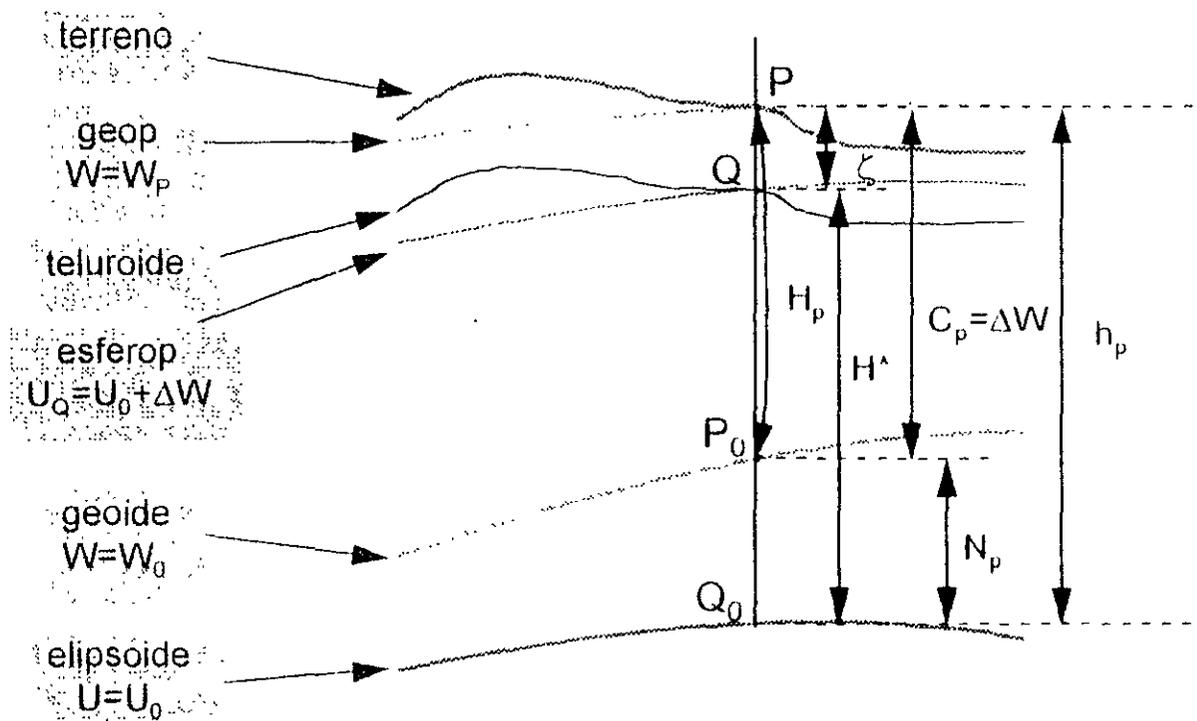
DATUM

INTRODUCCION



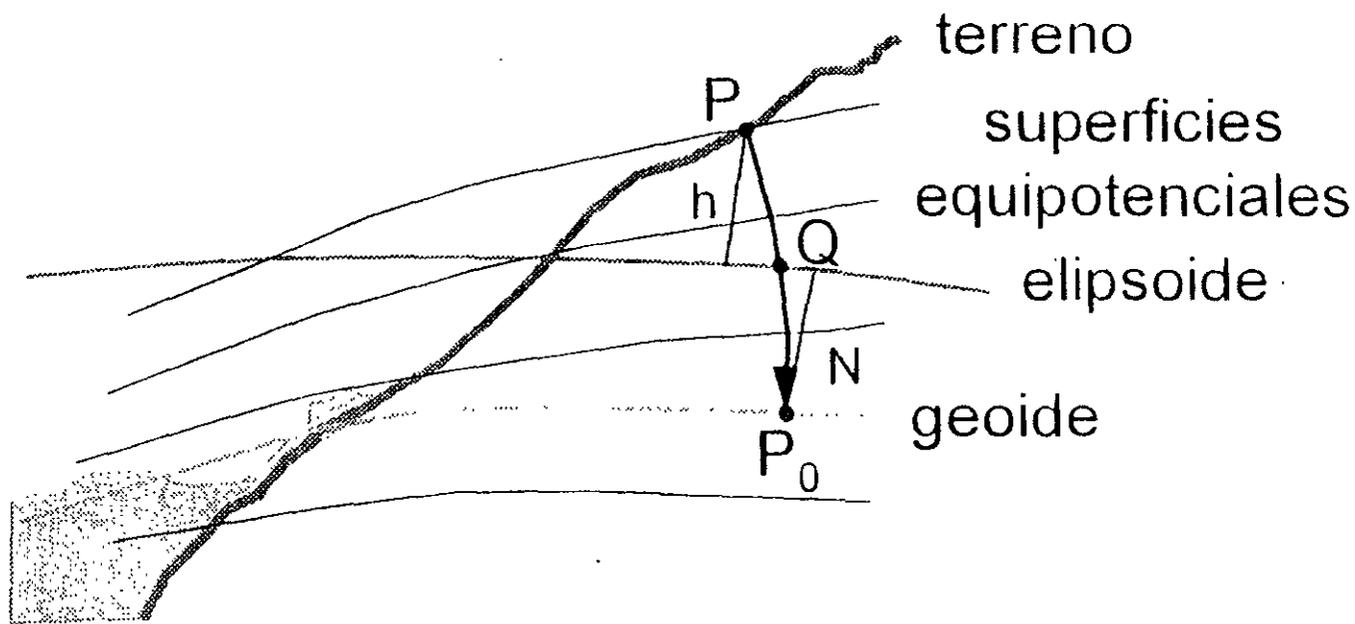
$$h \cong H + N$$

SISTEMAS DE ALTURAS



- | | | | |
|---------|---------------------|-------|--------------------|
| ζ | Anomalia de altura | h_p | Altura elipsoidal |
| H^* | Altura normal | H_p | Altura ortométrica |
| C_p | Número geopotencial | N_p | Altura geoidal |

SISTEMAS DE ALTURAS



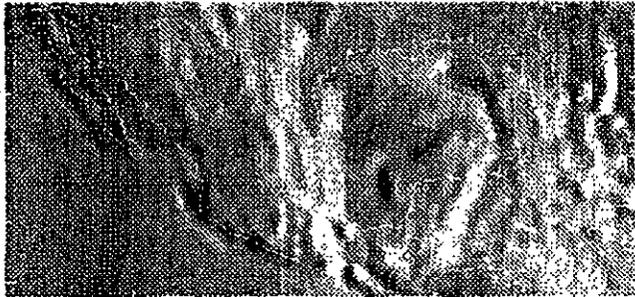
PP_0 altura ortométrica

OBJETIVO

- Determinar, en una primera etapa, un modelo geoidal para la República Mexicana con una resolución submétrica (rms).
- La segunda fase del proyecto, permitirá contar con una solución geoidal a nivel centimétrico (rms).

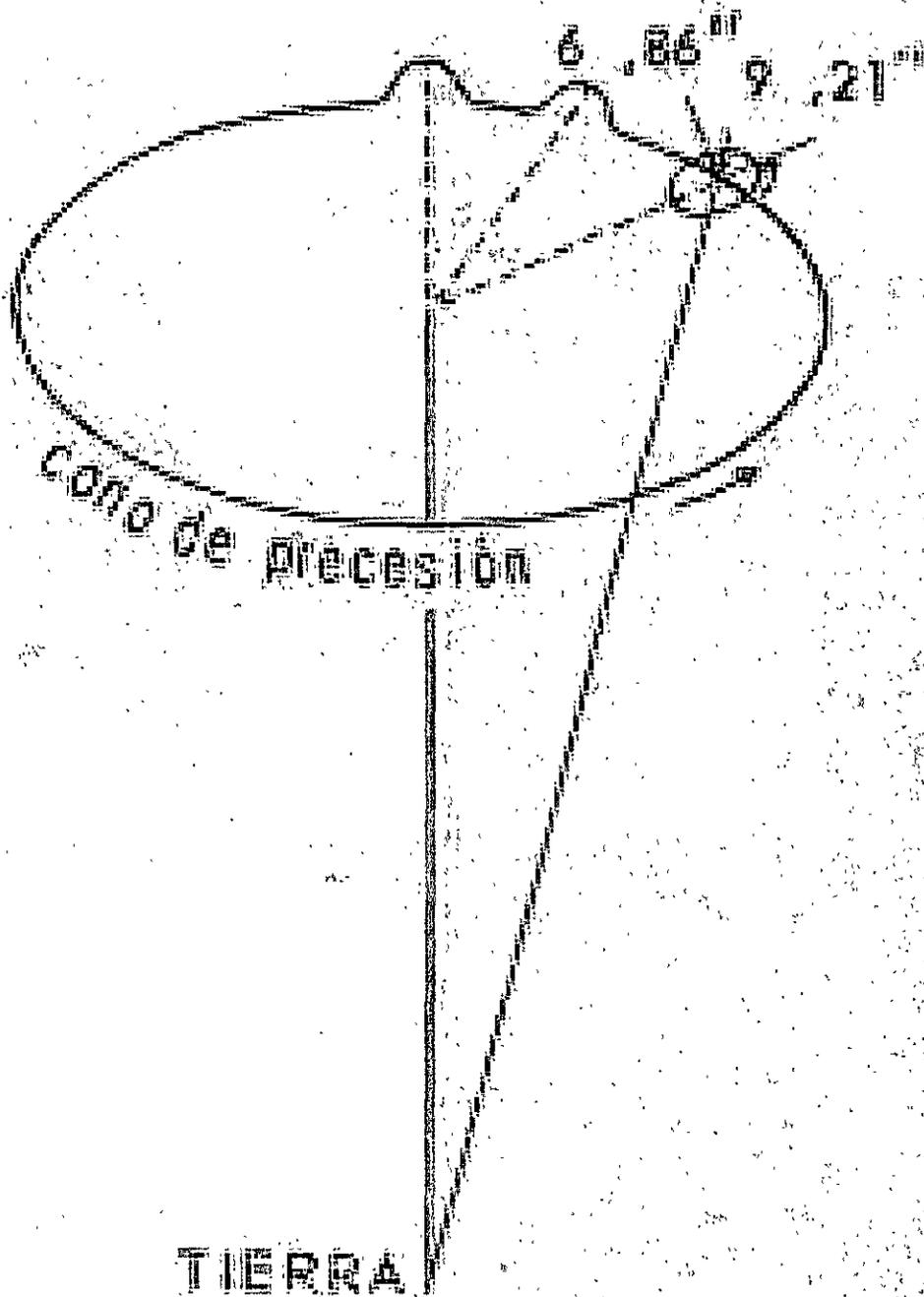
METODOLOGIA

- Para la primera etapa:
 - Modelo geopotencial EGM96 o MEXICO97
 - Alturas geoidales determinadas con GPS sobre bancos de nivel de primer orden existentes previamente.

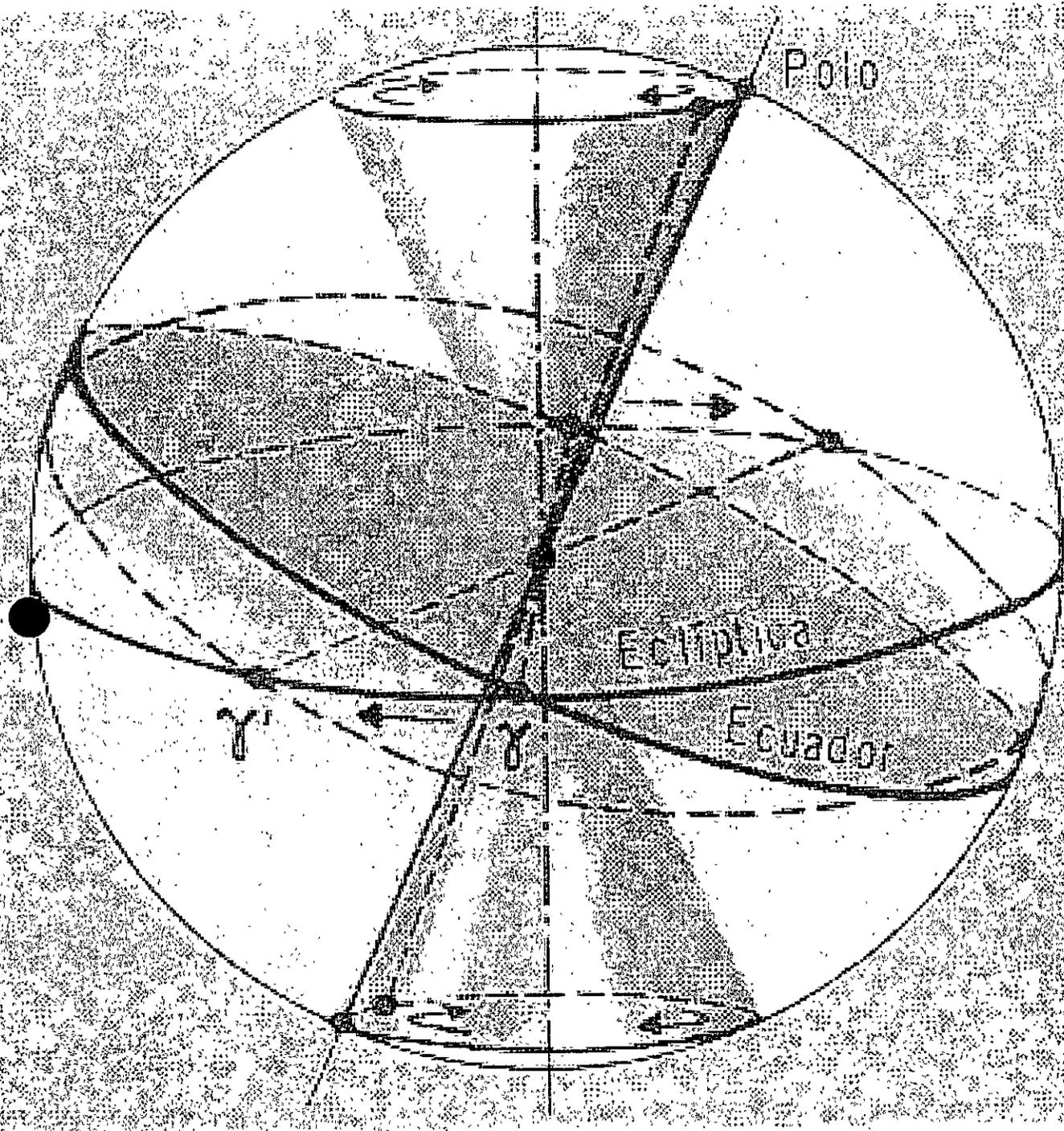


METODOLOGIA

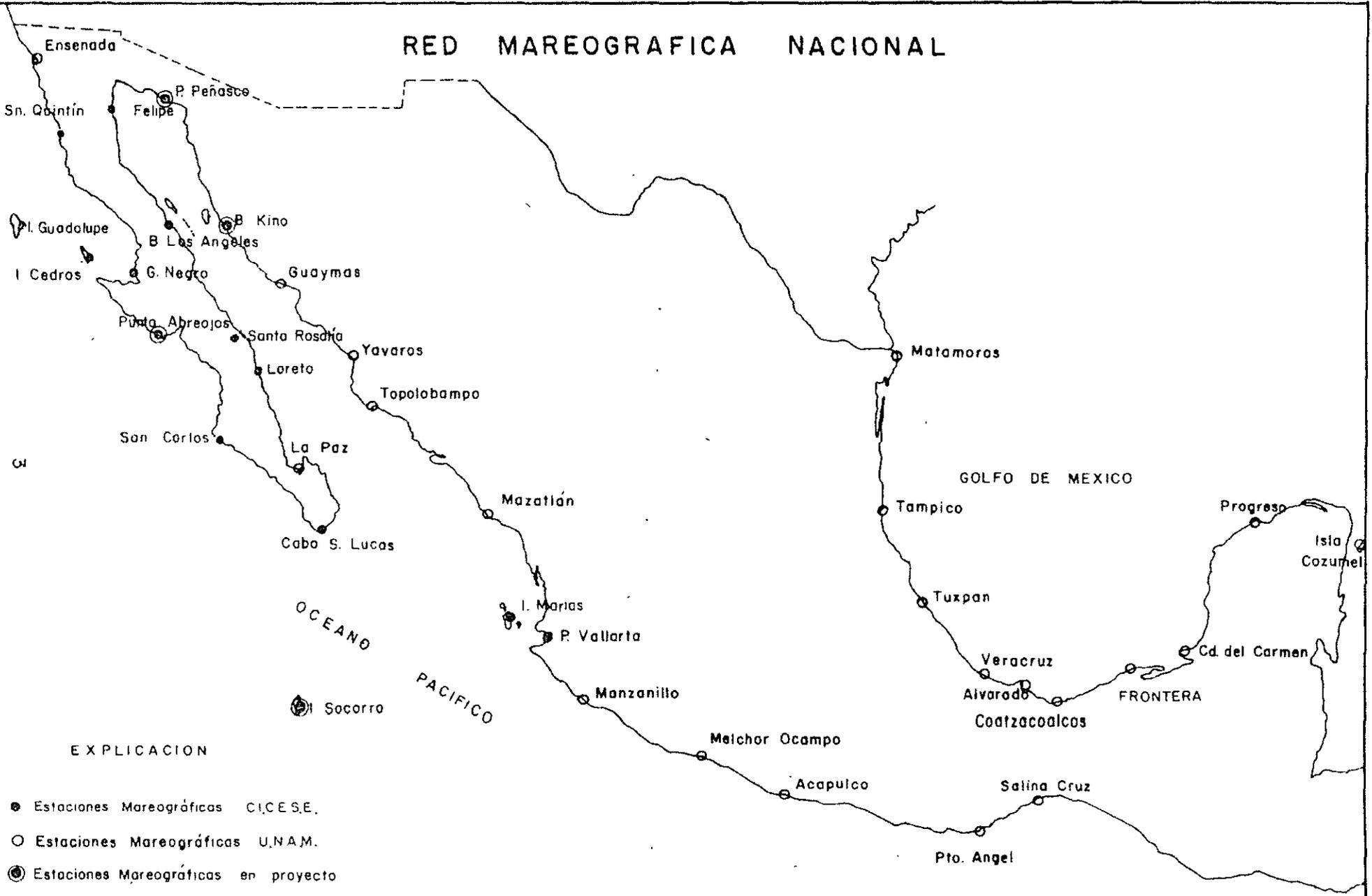
- La segunda etapa :
 - Gravedad superficial
 - Altimetría satelital sobre los oceanos
 - Modelos digitales de elevación
 - Alturas geoidales sobre bancos de nivel adicionales



**nutación
astronómica**



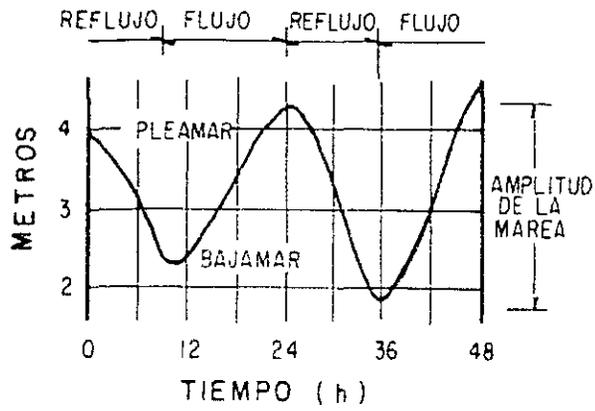
RED MAREOGRAFICA NACIONAL



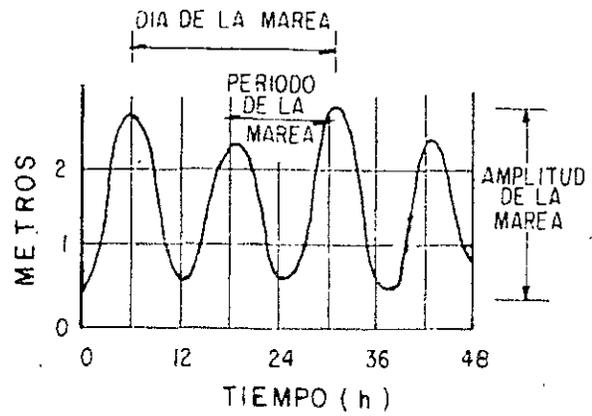
EXPLICACION

- Estaciones Mareográficas C.I.C.E.S.E.
- Estaciones Mareográficas U.N.A.M.
- ⊙ Estaciones Mareográficas en proyecto

Figura - I



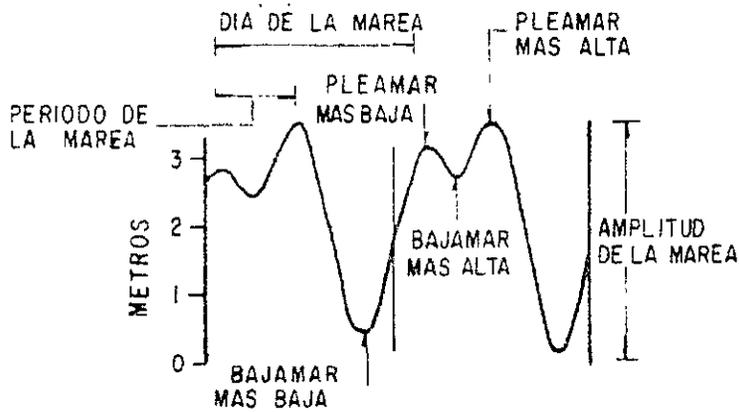
Manila, Islas Filipinas
DIURNA A



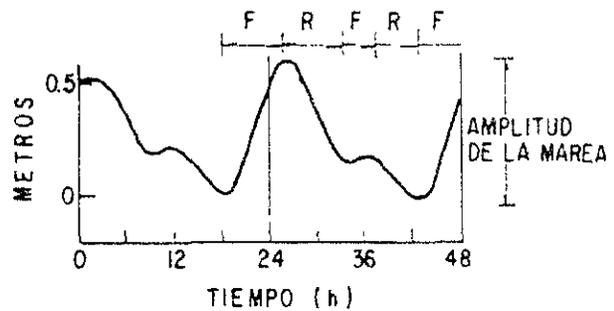
Boston
SEMIDIURNA B

MAREAS DE TIPO DIURNO Y SEMIDIURNO.

Fig. 4



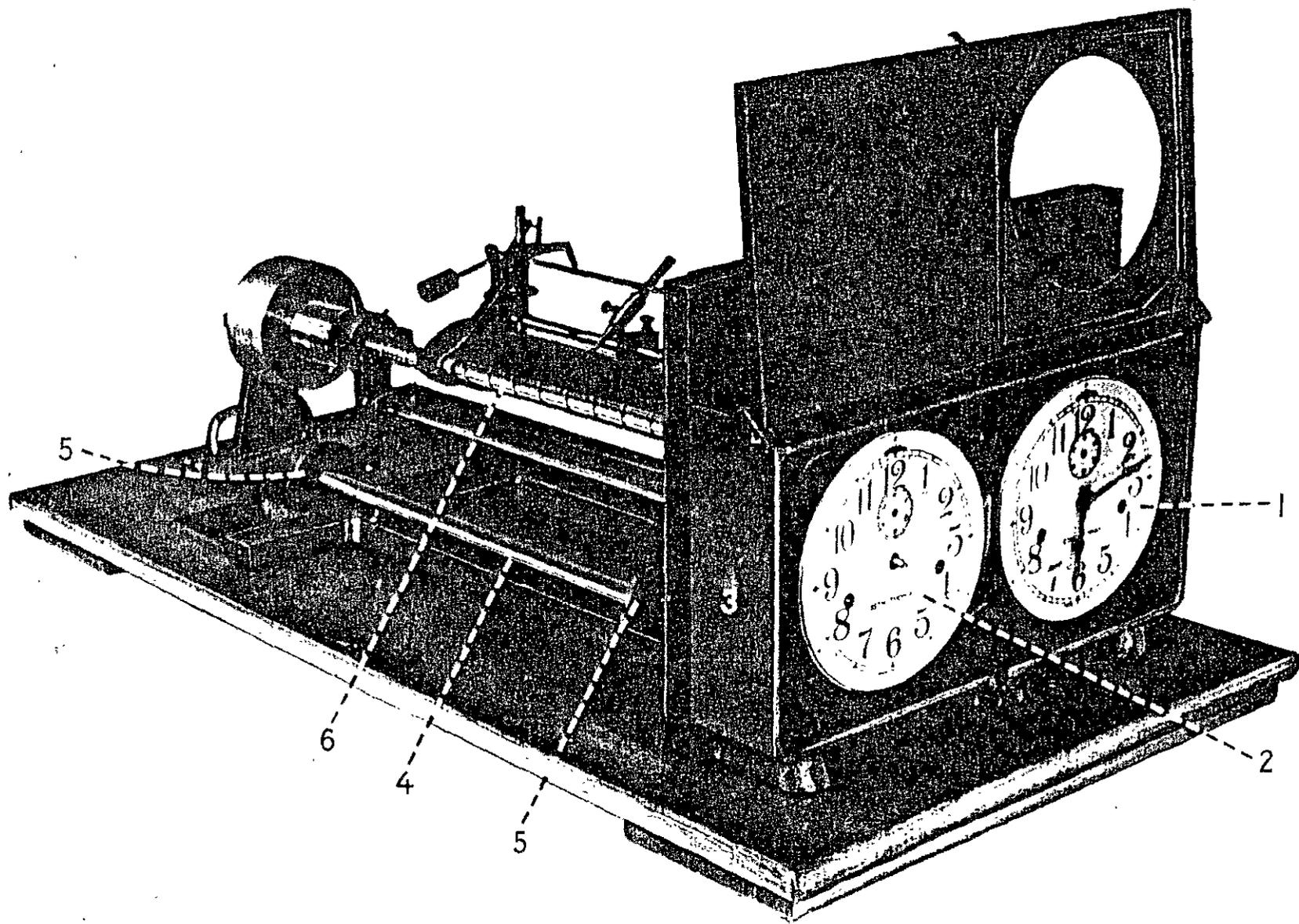
SEATTLE



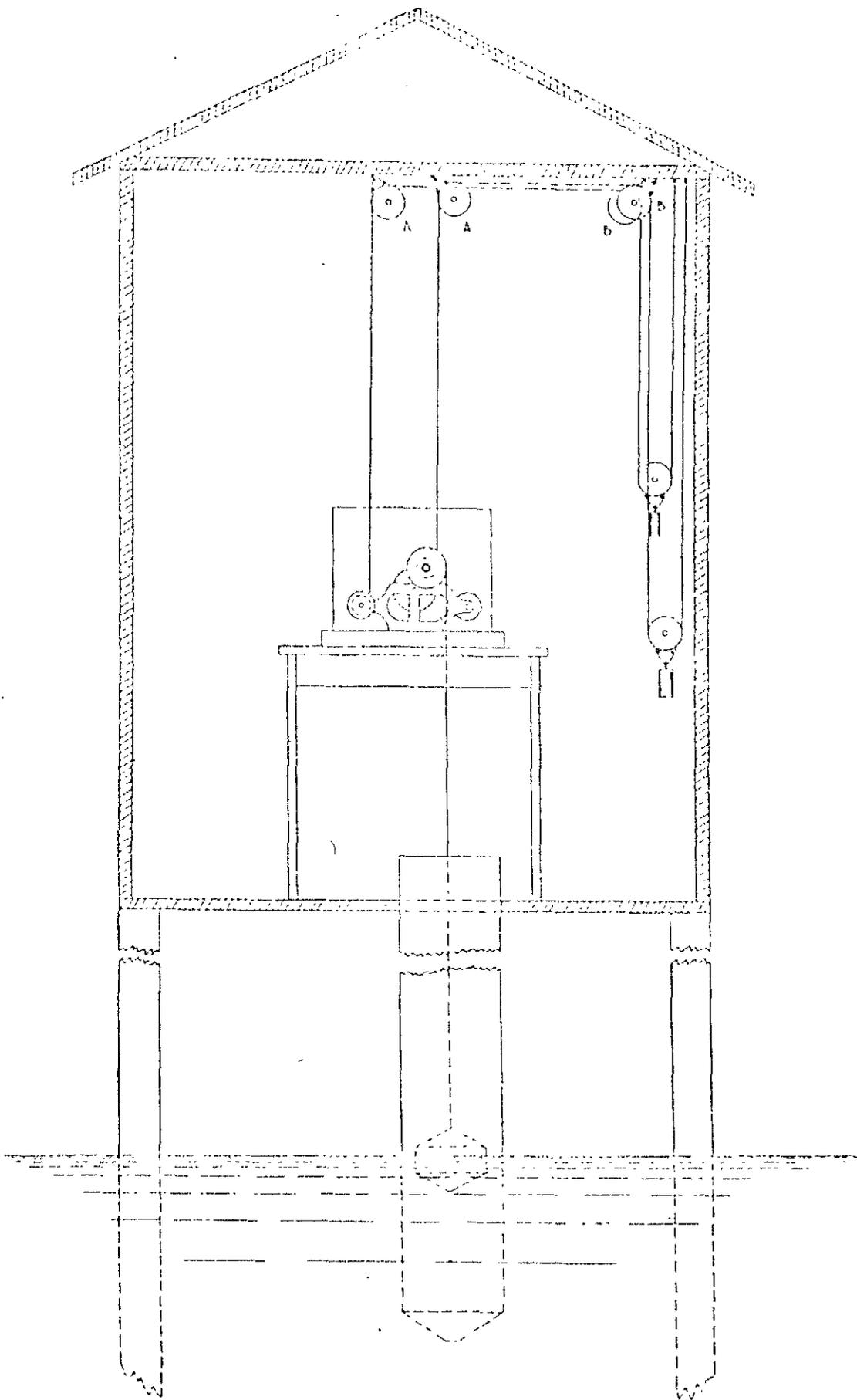
HONOLULU

EJEMPLOS DE MAREA DE TIPO MIXTO. F, flujo; R reflujo.

Fig. 5



Grabado 6
Mareógrafo automático tipo standard (vista del frente)



Vista esquemática de la instalación del
mareógrafo automático standard

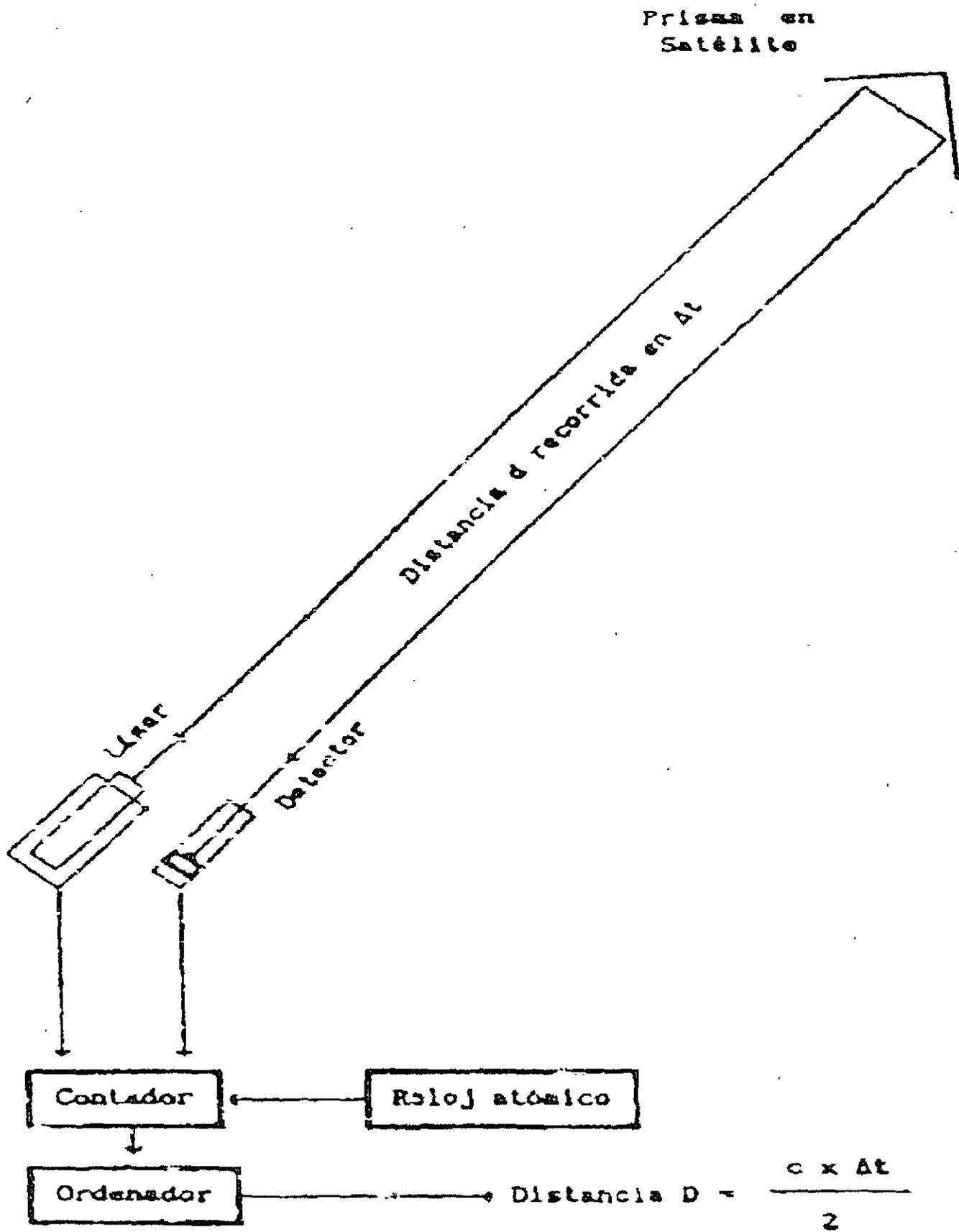


Figura 3.1. Sistema láser a satélite (SLR)

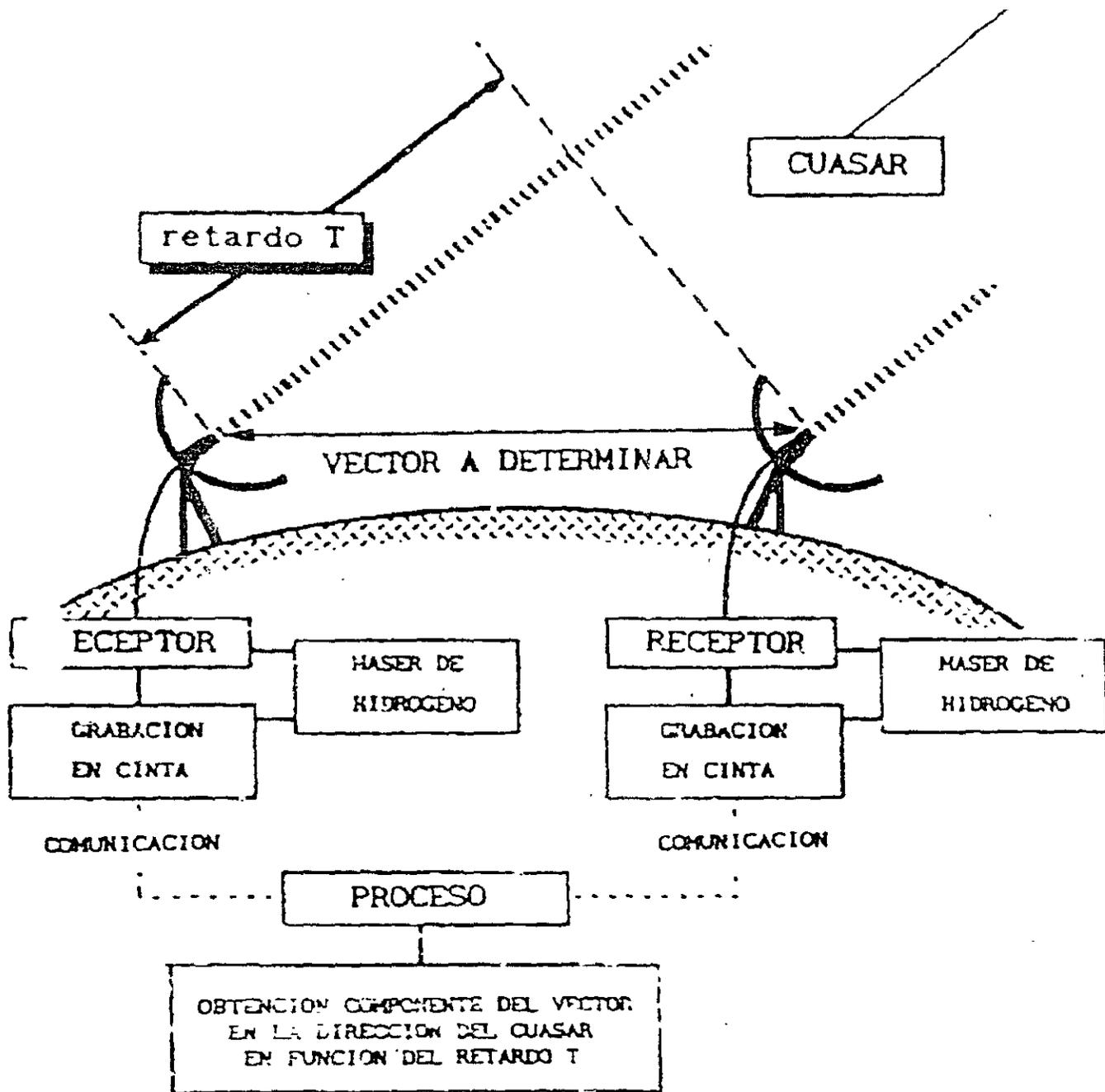


Figura 3.2 Interferometría de muy larga base (VLBI)