



MINISTERIO DE DEFENSA

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA  
EN SAN FERNANDO

**BOLETIN ROA**  
No. 1/2005

**CÁLCULO DE VECTORES DESPLAZAMIENTO EN  
EL SUR DE ESPAÑA-NORTE DE ÁFRICA,  
DEDUCIDOS A PARTIR DE LAS OBSERVACIONES GPS.**

**Fundación Alvargonzález**

**Real Instituto y Observatorio de la Armada**

**Alejandro Pérez Peña**

Foto Portada:  
Fachada Edificio Principal del Real Instituto y Observatorio de la Armada.  
(Siglo XVIII).



MINISTERIO DE DEFENSA

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA  
EN SAN FERNANDO

**BOLETIN ROA**  
No. 1/2005

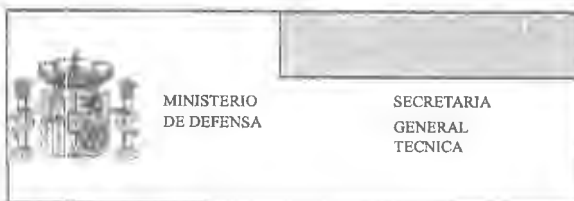
**CÁLCULO DE VECTORES DESPLAZAMIENTO EN  
EL SUR DE ESPAÑA-NORTE DE ÁFRICA,  
DEDUCIDOS A PARTIR DE LAS OBSERVACIONES GPS.**

**Fundación Alvargonzález**

**Real Instituto y Observatorio de la Armada**

Alejandro Pérez Peña

Edita:



Imprime: Real Instituto y Observatorio de la Armada  
San Fernando ( Cádiz ). Febrero 2005  
Depósito Legal: CA 469-78  
ISSN 1131-5040  
NIPO 076-05-013-0

---

**CÁLCULO DE VECTORES DESPLAZAMIENTO EN  
EL SUR DE ESPAÑA-NORTE DE ÁFRICA,  
DEDUCIDOS A PARTIR DE LAS OBSERVACIONES  
GPS.**

---

**Alejandro Pérez Peña**

**Servicio de Satélites. Sección de Geofísica.  
Real Instituto y Observatorio de la Armada.**



San Fernando, Enero 2005



Este trabajo me ha aportado una serie de conocimientos que me han introducido de lleno en el mundo de la Geodesia Espacial. Siempre he pensado que crecer profesionalmente tiene que ir unido al crecimiento personal, y en este sentido creo que este estudio ha sido muy productivo para mi, y por ello quisiera agradecer a las personas que me han ayudado.

Comenzando por Manuel Berrocoso Domínguez por su confianza, por todas las enseñanzas recibidas y por la gran comprensión y estímulo prestados. Deseo también manifestar mi gratitud a Jorge Gárate Pasquín y José Martín Dávila por su ayuda y su inestimable colaboración. Tampoco quiero olvidar a Alberto Fernández Ros por su constante apoyo y sin cuya ayuda me habría sido imposible llegar hasta aquí.

Muchas veces no valoramos suficientemente a las personas que vamos conociendo, pero en mi caso no puedo olvidarme de mis compañeros José Manuel, Eva, Raúl, Juan Antonio, Cristina y el resto de miembros del laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, que día a día me han dado ánimos y buenos consejos.

Todo el trabajo presentado ha sido realizado gracias a la Fundación Alvargonzález a la cuál quisiera agradecer que hallan confiado en mi para su realización. También quisiera agradecer la comprensión y las facilidades dadas por el Real Instituto y Observatorio de la Armada para la realización de este trabajo.

Finalmente, quisiera agradecer al IGN (*Instituto Geográfico Nacional*), el poder disponer de sus estaciones para la realización de este trabajo y al Observatorio Espacial de Onsala en Suecia por la obtención de los modelos de carga oceánica obtenidos.





# Índice general

<b>1. Sistemas de Referencia Geodésicos</b>	<b>11</b>
1.1. Sistema de Referencia Celeste . . . . .	12
1.2. Sistema de Referencia Terrestre . . . . .	13
1.2.1. Sistema de Referencia WGS-84 . . . . .	14
1.2.2. Sistema de Referencia ITRS . . . . .	15
1.2.3. Sistema de Referencia Terrestre Europeo ETRS89 . . . . .	17
1.3. Transformación entre los sistemas ITRF y ICRF . . . . .	18
<b>2. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS)</b>	<b>21</b>
2.1. Descripción del sistema. . . . .	21
2.1.1. El segmento espacial . . . . .	22
2.1.2. El segmento de control . . . . .	28
2.1.3. El segmento usuarios . . . . .	29
2.2. Modos de posicionamiento . . . . .	30
2.2.1. Posicionamiento absoluto . . . . .	31
2.2.2. Posicionamiento relativo . . . . .	32
2.3. Observables GPS . . . . .	35
2.3.1. Frecuencia, tiempo y fase de una señal . . . . .	36
2.3.2. Pseudodistancia . . . . .	37
2.3.3. Fase de la portadora . . . . .	39
2.3.4. Combinaciones de la portadora entre receptores y satélites . . . . .	41
2.3.5. Combinaciones de observables de fase . . . . .	44
2.4. Errores del sistema GPS . . . . .	45

2.4.1.	Geometría de los satélites observados . . . . .	46
2.4.2.	Propagación de la señal en la atmósfera . . . . .	47
2.4.3.	Efemérides de los satélites . . . . .	51
2.4.4.	Errores de los osciladores de satélites y receptores. . . . .	52
2.4.5.	Errores debidos a la relatividad . . . . .	52
<b>3.</b>	<b>Redes Geodésicas. Campañas de observaciones GPS</b>	<b>55</b>
3.1.	Introducción . . . . .	55
3.2.	Redes Tridimensionales . . . . .	56
3.2.1.	Redes GPS . . . . .	56
3.3.	La Red Geodésica del ROA . . . . .	56
3.3.1.	Vértices Geodésicos . . . . .	57
3.4.	Observaciones GPS . . . . .	59
3.4.1.	Febrero de 1998 . . . . .	60
3.4.2.	Septiembre de 1998 . . . . .	62
3.4.3.	Octubre de 1999 . . . . .	63
3.4.4.	Septiembre de 2001 . . . . .	65
3.4.5.	Campañas episódicas 2003 . . . . .	67
3.4.6.	Diciembre de 2003 . . . . .	69
<b>4.</b>	<b>Software Bernese GPS: Procesado de los datos</b>	<b>73</b>
4.1.	Estructura del programa . . . . .	73
4.2.	Preparación de los datos. Ficheros Externos . . . . .	75
4.3.	Transformación de los datos . . . . .	76
4.4.	Órbitas de los satélites . . . . .	76
4.5.	Pre-procesado de los datos . . . . .	78
4.6.	Estimación de parámetros . . . . .	80
4.7.	Ajuste final . . . . .	81
<b>5.</b>	<b>Resultados de las campañas observadas</b>	<b>83</b>
5.1.	Campaña Febrero de 1998 . . . . .	83

5.2. Campaña Septiembre de 1998 . . . . .	87
5.3. Campaña Octubre de 1999 . . . . .	89
5.4. Campaña Septiembre de 2001 . . . . .	93
5.5. Campañas Episódicas . . . . .	97
5.5.1. Campaña Episódica de Ceuta . . . . .	97
5.5.2. Campaña Episódica de Almería . . . . .	98
5.5.3. Campaña Episódica de Málaga . . . . .	99
5.6. Campaña Diciembre de 2003 . . . . .	100
<b>6. Desplazamientos horizontales</b>	<b>107</b>
6.1. Método de los mínimos cuadrados . . . . .	107
6.1.1. Modelo lineal simple . . . . .	108
6.2. Velocidad horizontal . . . . .	110
6.3. Comparación con otros modelos . . . . .	112
<b>Bibliografía</b>	<b>115</b>



# Índice de figuras

1.1. Sistema de referencia celeste. . . . .	13
1.2. Sistema de referencia terrestre. . . . .	14
2.1. Modulación Módulo-2 . . . . .	25
2.2. Generación de las señales GPS . . . . .	26
2.3. Contenido del mensaje de navegación. . . . .	28
2.4. Estaciones de control y seguimiento . . . . .	29
2.5. Componentes de un receptor GPS. . . . .	30
2.6. Posicionamiento absoluto. . . . .	31
2.7. Posicionamiento relativo o diferencial. . . . .	32
2.8. Posicionamiento GPS Diferencial. . . . .	35
2.9. Errores en los osciladores [1]. . . . .	38
2.10. Fase de la portadora . . . . .	40
2.11. Simples diferencias . . . . .	42
2.12. Dobles diferencias . . . . .	43
2.13. Triples diferencias . . . . .	44
2.14. Disposición geométrica de la atmósfera para el modelo ionosférico . . . . .	49
3.1. Estaciones de la red geodésica del ROA. . . . .	57
3.2. Estaciones procesadas en la campaña ROA-FEB1998. . . . .	61
3.3. Estaciones procesadas en la campaña ROA-SEP1998. . . . .	63
3.4. Estaciones procesadas en la campaña ROA-OCT1999. . . . .	64
3.5. Estaciones procesadas en la campaña ROA-SEP2001. . . . .	66
3.6. Estaciones procesadas en la campaña ROA-DIC2003. . . . .	70

4.1. Diagrama de Flujo del software Bernese GPS. . . . .	74
5.1. PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en el procesado de los datos. . . . .	84
5.2. Error cuadrático medio diario de cada una de las estaciones en la solución ajustada. 86	
5.3. PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en el procesado de los datos. . . . .	88
5.4. Error cuadrático medio diario de cada una de las estaciones en la solución ajustada. 89	
5.5. PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en la campaña ROA-OCT1999. . . . .	91
5.6. Error cuadrático medio diario de cada una de las estaciones en la solución ajustada. 92	
5.7. PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en el procesado de los datos. . . . .	94
5.8. Error cuadrático medio diario de las estaciones. . . . .	95
5.9. PPM de las baselíneas utilizadas en el campaña ROA-DIC2003. . . . .	101
5.10. Error cuadrático medio diario de las estaciones. . . . .	102
6.1. Mínimos cuadrados para la estación de San Fernando. . . . .	110
6.2. Mínimos cuadrados para la estación de Cartagena. . . . .	111
6.3. Desplazamientos absolutos horizontales en el ITRF2000 obtenidos en este trabajo con sus elipses de error. . . . .	112
6.4. Diferencia entre las velocidades finales y el modelo NNR-NUVEL 1A. . . . .	114
6.5. Desplazamientos horizontales obtenidos en este trabajo y comparados con el mod- elo NNR-NUVEL 1A. . . . .	114

# Introducción

Los estudios geológicos y geofísicos que se han desarrollado en la Tectónica de Placas nos han servido para saber que la litosfera terrestre fue segmentada, en otra era geológica, en diversos bloques que, actualmente reciben el nombre de Placas litosféricas. Dichas placas se mueven continuamente en diferentes direcciones y magnitudes, de acuerdo con la zona en la que se encuentran localizadas. Como consecuencia de dicho movimiento, las coordenadas geodésicas de un punto situado sobre dichas placas varían, dependiendo de la época en la que fueron obtenidas.

En este trabajo nos centraremos en la zona Sur de España en donde se encuentra la zona de contacto de las placas Euroasiática y Africana. La frontera entre dichas placas se extiende, en su parte más occidental, desde las islas Azores hasta el Estrecho de Gibraltar, para continuar por el Norte de África en dirección hacia Túnez. En esta amplia región se sitúa la zona designada como "Ibero-Magrebí", que abarca, aproximadamente el área delimitada por el macizo Ibérico por el Norte, las montañas del Atlas por el Sur, las costas atlánticas peninsulares por el Oeste y el Mediterráneo occidental por el Este.

Como consecuencia de dicho contacto se origina una amplia zona de deformación que se manifiesta en forma de terremotos de magnitud moderada, y ocasionalmente en forma de grandes terremotos.

Para el control de la deformación de la corteza terrestre, debido al movimiento de las placas litosféricas, se han adquirido en los últimos tiempos nuevos elementos, como son las observaciones geodésicas espaciales. Comenzando en la década de los 60 cuando se empezó a desarrollar la técnica VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) y posteriormente en los años 70 con la técnica SLR (*Satellite Laser Ranging*). Pero fue en la década de los 80 cuando surgió la técnica GPS (*Global Positioning System*), que constituye la técnica ideal para el control de dichas deformaciones.

Las observaciones GPS permiten detectar y cuantificar periódicamente las deformaciones acumuladas con una precisión menor del centímetro. Ello se consigue mediante la repetitividad de observaciones de satélites GPS.

El Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) trabaja en el campo de las observaciones geodésicas GPS desde mediados de los años 80, participando en diversas campañas realizadas tan-

to a escala regional (EUREF, SELF, TANGO,...) como nacional (IBERIA). Además actualmente cuenta con cinco estaciones permanentes repartidas en la zona "Ibero-Magrebí".

El principal objetivo de este trabajo es estimar y deducir las coordenadas geodésicas de un punto sobre la superficie terrestre y los vectores velocidad de un conjunto de estaciones repartidas por la zona, las cuales han sido observadas en diferentes campañas.

Este trabajo lo hemos dividido en tres partes. En la primera de ellas se hace una introducción a los diferentes sistemas de referencia existentes y que vamos a utilizar a lo largo del trabajo, para seguir con la teoría básica que hay detrás del sistema GPS. Enfatizando en los principales métodos de posicionamiento que existen así como las diferentes combinaciones de los observables.

En una segunda parte se describen las campañas de observación realizadas por el ROA a lo largo de los últimos años y se describe el software utilizado en el procesado de los datos y las principales estrategias llevadas a cabo.

Y por último en la tercera parte se presentan los resultados obtenidos en cada una de las campañas de una manera individual, tanto las coordenadas como sus precisiones para posteriormente presentar el modelo de deformación horizontal obtenido en la zona de estudio al comparar los resultados de cada campaña. Dicho resultado se ha comparado con el modelo geofísico de movimientos de placas NNR-NUVEL 1A (*No Net Rotation-Northwestern University Velocity model 1A*).

En un futuro, la interpretación conjunta tanto de datos sísmicos como geodésicos permitirán profundizar en el conocimiento del comportamiento tectónico de la zona y avanzar en la evaluación del riesgo sísmico en la región.



# Capítulo 1

## Sistemas de Referencia Geodésicos

Los trabajos geodésicos que implican la ubicación o posicionamiento de puntos dentro de nuestro planeta requieren siempre una clara definición sobre el sistema en el cual se proporcionan las coordenadas de los puntos. La posición y el movimiento de los cuerpos no son conceptos absolutos, necesitan referencias arbitrarias con respecto a los cuales puedan ser descritos. Dichos sistemas de referencia son matemáticamente fáciles de construir, pero su realización física no es tan sencilla. Las coordenadas de los satélites y de los receptores deben expresarse en un sistema de referencia bien definido.

Un sistema de coordenadas es una creación artificial para permitir la definición analítica de un objeto o de un fenómeno. Existen múltiples opciones para definir analíticamente la situación geométrica de un elemento y por tanto, es posible elegir entre diferentes sistemas de coordenadas. Desde el punto de vista matemático todos los sistemas de coordenadas son admisibles y la única razón para seleccionar uno u otro es la conveniencia. Entre los sistemas de coordenadas más empleados en geodesia se encuentran los sistemas cartesianos y los curvilíneos.

Se denomina sistema de referencia al conjunto de parámetros que define un sistema de coordenadas junto con una serie de constantes físicas que permite describir completamente el modelo de las observaciones.

Un sistema de referencia es aquel definido por un punto llamado origen y una terna de vectores fijos. A efectos de representar la superficie terrestre, a los sistemas de referencia se les suele asociar también un elipsoide como aproximación de la figura de equilibrio o geoide. La determinación del elipsoide de referencia incluye, además de los aspectos geométricos de forma y tamaño, parámetros físicos como la constante gravitacional, masa terrestre total, potencial en su superficie, etc.

Se suele distinguir entre sistema de referencia (*reference system*) y marco de referencia (*reference frame*). El primero de ellos se entiende como una definición teórica, es decir, a partir de consi-

deraciones matemáticas y físicas, que incluye los modelos para su implementación. Y el segundo es su realización práctica realizada a través de diferentes observaciones y constituido por puntos materializados en el terreno y ubicados con gran exactitud y precisión [24].

Los satélites se mueven fuera de la Tierra y por ello sus posiciones se deben de referir a un sistema de referencia celeste, mientras que las coordenadas de las estaciones están sobre la Tierra y deben referirse a un sistema terrestre.

La determinación de sistemas de referencia terrestre y celeste están relacionados debido a la compleja composición de la Tierra, su iteración con la atmósfera, y las fuerzas gravitatorias mutuas con la Luna y el Sol.

## 1.1. Sistema de Referencia Celeste

Para definir la posición de objetos en la Tierra como las estrellas, cuásares o satélites artificiales los sistemas de referencia más apropiados son los inerciales, es decir, aquellos que aplican el cálculo matemático de la mecánica newtoniana. Dichos sistemas inerciales quedarían materializados en el sistema solar tomando como origen su baricentro y unas ciertas direcciones fijas. Estos pueden ser, por ejemplo, en un sistema ecuatorial, la posición del Polo Celeste, y la del equinoccio vernal en una época determinada, como la época J2000.0.

Sin embargo no es posible considerar un sistema inercial porque no se tendrían en cuenta los efectos relativistas, que depende del campo de gravedad de la Tierra, y estarían sometidos a aceleraciones debido al movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. A dicho sistema se le denomina *quasi-inercial* y en él, los ejes se desplazan paralelamente a sí mismos

Ahora bien resulta que el eje de rotación de la Tierra no es fijo en el espacio, ya que su vector velocidad angular varía tanto en módulo (variación de la duración de los días), como en dirección. Dicho movimiento puede ser descrito como la suma de dos componentes:

- Nutación y precesión astronómica con respecto al sistema coordenado inercial.
- Movimiento del polo con respecto al sistema de referencia terrestre.

Así la elección de un sistema de referencia celeste viene impuesta por los movimientos de nutación, precesión y movimiento del polo, es decir por los movimientos de traslación y rotación.

En 1997 la IAU (*Internacional Astronomical Union*) decidió adoptar como sistema de referencia celeste el ICRS (*Internacional Celestial Referente System*). Dicho sistema tiene su origen en el baricentro del sistema solar. El eje  $X$  se encuentra en la dirección del equinoccio de la época J2000.0, el eje  $Z$  es ortogonal al plano definido por el ecuador medio en la época J2000.0, y el eje  $Y$  es ortogonal a los anteriores de forma que el sistema se oriente en sentido directo (Figura

1.1).

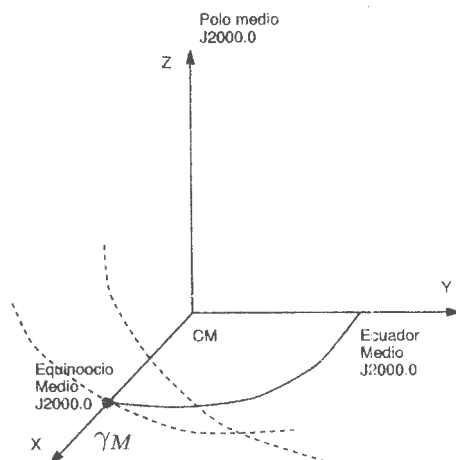


Figura 1.1: Sistema de referencia celeste.

El ICRS es materializado por el ICRF (*International Celestial Reference Frame*) que consiste en un catálogo de coordenadas ecuatoriales precisas (ascensión recta y declinación) de más de 200 radiofuentes extragalácticas en la época J2000.0, calculadas para que no tengan movimiento propio neto. Se han ido construyendo diferentes realizaciones del ICRF, como por ejemplo, el catálogo Hipparcos y las efemérides JPL del sistema solar.

## 1.2. Sistema de Referencia Terrestre

Los sistemas de referencia terrestre se utilizan para determinar coordenadas de puntos sobre la superficie terrestre, por lo que están afectados por el movimiento de rotación de la Tierra, apareciendo la aceleración centrífuga y la fuerza de Coriolis, por ello son sistemas no inerciales.

El principal problema de estos sistemas es conseguir direcciones fijas invariable con el tiempo, y para ello se adoptó por convenio un polo medio, definido como la posición media del eje de rotación terrestre, con relación a la figura sólida de la Tierra, entre los años 1900,0 y 1905,0, este polo se denominó *Conventional International Origin, CIO*, y en la actualidad se denomina *Conventional terrestrial Pole, CTP*, relacionando el CIO con el eje Z.

El sistema de referencia terrestre convencional (*Conventional Terrestrial Reference System, CTRS*) (Figura 1.2), se define del siguiente modo:

- Origen: Centro de masas terrestre o geocentro.
- Eje Z: En la dirección del Polo terrestre convencional CTP.

- Eje X: Perpendicular al anterior, que pasa por el origen y por el meridiano de Greenwich en la época 1903.0, adoptado como meridiano de referencia.
- Eje Y: Perpendicular a los dos ejes anteriores y contenido en el ecuador medio, formando un sistema de coordenadas rectangular.

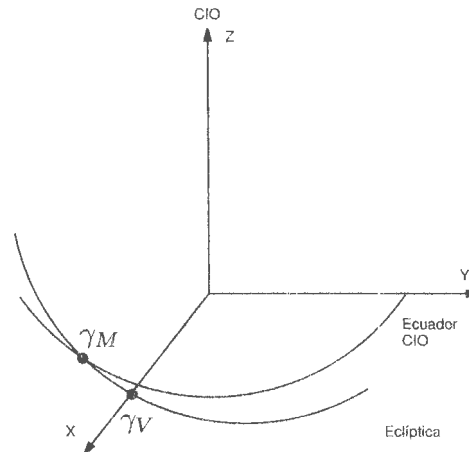


Figura 1.2: Sistema de referencia terrestre.

El elipsoide recomendado es el GRS80, cuyas características físicas son  $a = 6378137,0$  m,  $e^2 = 0,00669438003$ . Ejemplos de dichos sistemas son el ITRS (*International Terrestrial Reference system*) y el WGS-84 (*World Geodetic System*), que vamos a desarrollar a continuación.

### 1.2.1. Sistema de Referencia WGS-84

El *National Imagery and Mapping Agency (NIMA)* desarrolló un sistema de referencia mundial, el *World Geodetic System 1984 (WGS84)*. El WGS84 es el sistema que se utiliza desde 1987 para el GPS.

El WGS84 es un sistema de referencia ortogonal fijo a la Tierra y directo. En su definición sigue los criterios recomendados por el IERS para la definición de sistemas de referencia terrestres.

Es un sistema geodésico, cuyo origen es el centro de masas que se definió para toda la Tierra incluidos los océanos y la atmósfera y la definición de sus ejes es la siguiente: Eje Z, paralelo a la dirección del Polo Terrestre Convencional (CTP), y que se corresponde con el definido por el Bureau International de la Hora (BIH) con una indeterminación de  $0,005''$ ; Eje X, es la intersección entre el meridiano origen de latitudes definido por el BIH, y que coincide con el meridiano de referencia con una indeterminación de  $0,005''$ , y el plano del ecuador, plano perpendicular al eje Z que pasa por el origen; Eje Y, completa con los ejes anteriores una terna ortogonal de ejes fijos a la Tierra, está en el plano del ecuador, a  $90^\circ$  al este del eje X.

Este sistema de referencia tiene asociado el elipsoide de referencia cuyos parámetros son muy aproximados a los definidos por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica para el GRS80. Los parámetros elegidos para definir el elipsoide del sistema WGS84 son el semieje mayor, la constante de gravitación terrestre, el coeficiente zonal normalizado de segundo grado, y la velocidad angular de rotación terrestre.

En la tabla 1.1 se muestran los valores adoptados de dichos parámetros, así como otras constantes físicas y geométricas de dicho elipsoide.

Parámetro	Valor
Semieje mayor	$a = 6378137 \text{ m}$
Semieje menor	$b = 6356752 \text{ m}$
Aplanamiento	$f = 1/298,25722356$
Velocidad angular de la Tierra	$\omega = 7292115 \cdot 10^{-11} \text{ rad/s}$
Constante de gravitación	$GM = 3986004,418 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$
Coficiente normalizado de segundo grado	$J_2 = -484,16685 \cdot 10^{-6}$

Tabla 1.1: Parámetros del elipsoide del sistema WGS84.

Se han realizado dos actualizaciones, del WGS84, una de ellas denominada WGS84(G730), en la época 1994, y otra denominada WGS84(G873), en la época 1997.0. No existen parámetros oficiales de transformación entre ambos marcos de referencia.

### 1.2.2. Sistema de Referencia ITRS

El sistema de referencia terrestre, de cuyo seguimiento se encarga el IERS (*International European Reference System*) se denomina Sistema de Referencia Terrestre Internacional (*International Terrestrial Reference System, ITRS*) y fue especificado por la resolución n° 2 del IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*) adoptada en la vigésima Asamblea General del IUGG celebrado en Viena (Austria) en 1991.

La definición del sistema ITRS es consistente con la de un sistema de referencia terrestre ya que procura que el eje polar medio este orientado en la misma dirección que el CIO y el origen de las longitudes sea común, próximo al meridiano de Greenwich. Con ello se permite establecer una terna de ejes tales que el eje  $Z$  está dirigido al polo medio, el eje  $X$ , sobre el plano ecuatorial (perpendicular a  $Z$ ) y dirigido al meridiano origen de las longitudes, y el eje  $Y$  sobre el mismo plano y perpendicular a los anteriores. El origen de este sistema es el baricentro de la Tierra, incluyendo a la atmósfera. La unidad de longitud es el metro.

La materialización de este sistema es un marco de referencia internacional, el ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), que consiste en un conjunto de coordenadas y velocidades

geocéntricas de unas 180 estaciones.

### International Terrestrial Reference Frame, ITRF

El ITRF es el marco de referencia más preciso utilizado actualmente. Está constituido por un conjunto de coordenadas y velocidades geocéntricas, a las cuales se les denomina *Set of Station Coordinates (SSC)*. Para la determinación de dichas coordenadas se emplean técnicas de geodesia espacial tales como VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), GPS (*Global Positioning System*) y DORIS (*Doppler Orbitography and Radio-positioning integrated by Stellite*), que permiten determinar coordenadas cartesianas geocéntricas de todas las estaciones con una precisión absoluta que oscila entre  $\pm 0,5$  cm y  $\pm 2$  cm. Con esta precisión, es posible medir, entre otros aspectos de la dinámica terrestre, es decir, el movimiento de las diferentes placas tectónicas. Por ello, las estaciones están repartidas sobre doce de las placas más grandes.

Como se han realizado varias materializaciones desde 1988 para su identificación se representan por ITRF $yy$ , donde  $yy$  se corresponde con la solución basada en las observaciones realizadas antes del fin del año indicado, excepto ITRF2000 (sería ITRF $yyyy$ ). El tratamiento de las observaciones se lleva a cabo durante el año siguiente al de observación. Las realizaciones tienen una época de referencia y adoptan para esa fecha los parámetros de orientación terrestres, quedando definidas con ello las diferentes soluciones ITRF. Entre la primera realización ITRF88 y la última ITRF2000, existen soluciones disponibles para los años 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96 y 97. Próximamente está prevista la realización ITRF2004.

Su continua evolución permite agregar nuevas estaciones cada año y mejorar la precisión general del conjunto, Así cada ITRF difiere del resto en pequeñas variaciones de posiciones y velocidades. En su conjunto, estas diferencias permiten encontrar parámetros de transformación entre las distintas materializaciones del ITRS. Estas transformaciones están en niveles milimétricos.

En el procesado de datos GPS intervienen las coordenadas de los satélites y dichas coordenadas están referidas a un marco de referencia dependiente de la época en la que se obtuvieron. Y por ello a la hora de obtener posiciones relativas de estaciones es necesario por tanto poner en concordancia las coordenadas de las estaciones con el ITRF $yy$  al que están referidas las coordenadas de los satélites GPS y reducirlas a la época de observación, es decir debemos de realizar transformaciones entre diferentes realizaciones del ITRS.

Si ambas coordenadas están referidas al mismo ITRF y  $t$  es la época de observación y  $t_0$  la época a las que están referidas las órbitas de los satélites, tendremos las coordenadas de la estación en la época  $t$  mediante la relación

$$X_{yy}(t) = X_{yy}(t_0) + V_{X_{yy}} \cdot (t - t_0) \quad (1.1)$$



Si están referidas a otro ITRF necesitamos pasar de uno a otro y para ello se realiza una transformación de Helmert de siete parámetros; tres traslaciones, tres rotaciones y un cambio de escala dada por

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{zz} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{yy} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_Z & R_Y \\ R_Z & D & -R_X \\ -R_Y & R_X & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{yy} \quad (1.2)$$

en donde ITRF<sub>yy</sub> es la realización inicial, ITRF<sub>zz</sub> la realización final,  $T_X$ ,  $T_Y$  y  $T_Z$  son traslaciones y  $R_X$ ,  $R_Y$  y  $R_Z$  son rotaciones alrededor de los ejes  $X, Y, Z$  y  $D$  es un factor de escala.

El IERS ha publicado los valores de los parámetros anteriores de transformación. Como el sistema ITRF actual es el ITRF2000 en la tabla 1.2 se dan los parámetros de transformación entre diferentes ITRF y el ITRF2000

ITRF	$T_x(cm)$	$T_y(cm)$	$T_z(cm)$	$D(ppb/y)$	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$t_0$
ITRF97	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF96	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF94	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
ITRF93	1.27	0.65	-2.09	1.95	-0.39	0.80	-1.14	1988.0
ITRF92	1.47	1.35	-1.39	0.75	0.00	0.00	-0.18	1988.0

Tabla 1.2: Parámetros de transformación entre el ITRF2000 y los anteriores.

En 1990, la subcomisión EUREF (*European Reference Frame*) de la IAG (*International Association of Geodesy*) decidieron que las coordenadas ITRF89 de las 36 estaciones europeas IERS definieran el marco de referencia terrestre europeo (ETRF89). Para densificar esta red se tomaron 71 estaciones adicionales distribuidas por toda Europa.

### 1.2.3. Sistema de Referencia Terrestre Europeo ETRS89

En el simposium de EUREF celebrado en Florencia (Italia) en 1990 se decidió que el sistema de referencia que se adoptase coincidiese con el ITRS en la época 1989.0 y se fijase a la parte estable de la placa Euroasiática. Así se determinó el European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89). Se trata del sistema de referencia más preciso que se utiliza actualmente en Europa.

A consecuencia de esta definición, ETRS89 rota solidariamente con la parte estable de la placa europea y la relación entre sus estaciones permanece. En el simposium de 1992 se adoptó como elipsoide utilizado para el ETRS89 el GRS80.

Al igual que el IERS calcula las diferentes realizaciones del ITRS también el ETRS89 que se llama ETRFYY. Para ello se seleccionan estaciones pertenecientes a ITRF y que estén localizadas en

Europa.

### 1.3. Transformación entre los sistemas ITRF y ICRF

Los sistemas de referencia terrestre y celeste están conectados entre sí mediante una matriz de rotación  $R$ , que la podemos poner en función de tres nuevas matrices de rotación

$$\bar{r}_{CTS} = SNP\bar{r}_{CIS},$$

donde  $S$ ,  $N$  y  $P$  denotan las matrices de rotación de los ejes debido al movimiento del polo, a la nutación y a la precisión, respectivamente. Estudiemos ahora cada uno de los movimientos de manera individual.

#### Precisión

La Tierra presenta un ensanchamiento ecuatorial debido a su rotación. El efecto gravitacional de la Luna y del Sol sobre este ensanchamiento hace que el eje de rotación de nuestro planeta, no esté fijo en el espacio, sino que describa una circunferencia. El movimiento que realiza el eje terrestre al describir esta circunferencia se llama precesión. La precesión tiene una duración de 25.800 años.

Cuando sólo es considerada la influencia de la precisión, entonces a la posición y orientación del plano ecuatorial y del primer punto de Aries se les llama ecuador medio y equinocio medio. Dichas posiciones medias pueden ser transformadas desde la época  $t_0$  (Enero-2000) hasta la época  $t$  de la observación requerida mediante la matriz de precisión, compuesta por tres matrices de rotación

$$P = R_3(-z_A)R_2(\theta_A)R_3(-\xi_A), \quad (1.3)$$

donde los ángulos de rotación vienen definidos por la IAU en 1976 como

$$\xi_A = 0^\circ,6406161 \cdot T + 0^\circ,0000839 \cdot T^2 + 0^\circ,0000050 \cdot T^3,$$

$$z_A = 0^\circ,6406161 \cdot T + 0^\circ,0003041 \cdot T^2 + 0^\circ,0000051 \cdot T^3,$$

$$\theta_A = 0^\circ,5567530 \cdot T - 0^\circ,0001185 \cdot T^2 - 0^\circ,0000116 \cdot T^3.$$

$T = (t - t_0)$  es contado en siglos Julianos de 36525 días [24].

#### Nutación

La nutación es la suma de movimientos periódicos del polo de efemérides alrededor del polo medio. La matriz de nutación esta compuesta por tres sucesivas matrices de rotación.

$$N = R_1(-\epsilon - \Delta\epsilon)R_3(-\Delta\psi)R_3(c),$$



donde  $\epsilon$  es la oblicuidad media de la eclíptica,  $\Delta\epsilon$  es la nutación en oblicuidad y  $\Delta\psi$  es la nutación en longitud. La oblicuidad media viene dada por  $\epsilon = 23^{\circ}26'21'',448 - 46'',815 \cdot T - 0'',00059 \cdot T^2 + 0'',001813 \cdot T^3$ .

En 1980 la IAU adoptó un modelo de nutación basado en un modelo de Tierra elástica, y entonces  $\Delta\epsilon$  y  $\Delta\psi$  vienen dadas por series de cosenos y senos y por la combinación lineal de cinco constantes fundamentales [21].

### Movimiento del Polo

La transformación del movimiento del polo viene dada por el producto de dos matrices de rotación  $R_2(-x_p)R_1(y_p)$ , donde  $x_p$  y  $y_p$  indican la posición relativa del polo instantáneo verdadero con respecto al polo terrestre convencional CTP.



## Capítulo 2

# El Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El NAVSTAR GPS (*Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System*) es un sistema de posicionamiento espacial, independiente de las condiciones meteorológicas y basado en la recepción de señales electromagnéticas emitidas desde satélites artificiales y recogidas por receptores, para evaluar así la distancia entre ambos puntos. El NAVSTAR GPS fue desarrollado por el Joint Program Office (JPO) desde 1970 para el Departamento de Defensa (DoD) de los Estados Unidos.

Aunque inicialmente sólo tuvo fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo, los estamentos científicos civiles lo están aprovechando desde comienzos de la década de los 80 y en la actualidad es utilizado para muy diversos fines. El departamento de defensa de los EEUU agregaba un error intencional, la disponibilidad selectiva (SA), al sistema para restringir su uso a los receptores civiles. Fue a partir del año 2000 cuando se desactivo dicho error.

El sistema GPS proporciona óptimas prestaciones en cuanto a productividad, tiempo de observación, fácil adquisición y procesado de datos y transporte de equipos receptores. El funcionamiento del sistema GPS se basa en la medida de las distancias existentes entre el receptor, cuya posición se quiere determinar, y un conjunto de satélites cuya posición se conoce con precisión.

### 2.1. Descripción del sistema.

El sistema GPS esta compuesto por tres grandes bloques o segmentos bien diferenciados. Por una parte el segmento espacial constituido por los satélites, por otra el segmento de control

constituido por las estaciones encargadas del seguimiento y control de los satélites, y por último el segmento de usuario en el que podemos incluir cualquier receptor que un usuario disponga.

### 2.1.1. El segmento espacial

Consiste, por un lado, en una constelación de satélites, y por otro, en la transmisión de la señal necesaria para que el sistema sea operativo.

Un satélite GPS es un vehículo espacial dotado esencialmente de transmisores/receptores de radio frecuencia, relojes atómicos, microprocesadores, paneles solares, propulsores y equipos auxiliares. Actualmente existen 31 satélites operativos, más de lo que se pensó inicialmente, puesto que su vida útil es mayor que la prevista. Desde el lanzamiento del primer satélite varios han sido los tipos o modelos enviados, y conocidos por Bloque I, II, IIR, IIA y próximamente el Bloque IIF.

Los satélites del bloque I son los prototipos iniciales construidos por Rockwell Corporation. Los 11 satélites que forman el bloque fueron lanzados entre los años 1978 y 1985 desde la base de Vandenburg en California. Dichos satélites se hicieron para proporcionar de 3 a 4 días de servicio de posicionamiento sin contacto con el segmento de control. Actualmente se encuentran fuera de uso y se han ido sustituyendo por otros mejor equipados, pertenecientes al bloque II.

Los satélites del bloque II empezaron a lanzarse a partir de 1989 y también fueron construidos por Rockwell Corporation. En teoría, cuatro de ellos estarían en reserva hasta que se requisieran pero en la práctica han sido activados. Son capaces de proporcionar posicionamiento preciso durante 14 días sin contacto con el segmento de control. Una variación del bloque II es el IIA que incorpora una técnica de encriptación de la señal denominada Anti-Spoofing (AS)<sup>1</sup> y aumenta a 180 días su autonomía de posicionamiento. Cada uno de los satélites de ambos bloques contiene cuatro relojes atómicos: dos de Cesio, con una precisión de  $10^{-13}$  y dos de Rubidio, de  $10^{-12}$ . La precisión de un reloj, o más propiamente su estabilidad se mide sobre un segundo y representa la dispersión de los valores de la frecuencia de banda. El conjunto de los osciladores de todos los satélites más los osciladores del segmento de control forman la base de tiempos del sistema GPS.

Los satélites del bloque IIR se diseñaron para que fueran reemplazando a los anteriores bloques, al final de su vida útil. Fueron desarrollados por General Electric Corporation y comenzaron a lanzarse en el año 1997. Su principal característica es que poseen osciladores atómicos de Hidrógeno, también conocidos como máseres de Hidrógeno, con precisiones de hasta  $10^{-15}$ . Esta precisión representa una variación de 3 milésimas de milímetro o un segundo en 30 millones de años. Tienen la capacidad de determinar automáticamente su órbita y generar su propio mensaje de navegación.

Los satélites del bloque IIF están en fase de diseño y tendrán la característica de poder incorporar

---

<sup>1</sup>Método de codificación de la señal consiste en encriptar el código P mediante el uso del llamado código protegido Y. Solamente usuarios autorizados tienen acceso al código P cuando el AS es activado.

Tipo de Oscilador	Precisión	Pérdida de un segundo
Cuarzo	$10^{-9}$	30 años
Rubidio	$10^{-12}$	30.000 años
Cesio	$10^{-13}$	300.000 años
Máser de Hidrógeno	$10^{-15}$	30.000.000 años

Tabla 2.1: Precisión de los osciladores.

una frecuencia adicional de la transmisión. Su lanzamiento está previsto a partir del año 2005.

Existen diversas nomenclaturas para designar cada uno de los satélites GPS: según el número Navstar (SVN), que es el orden de lanzamiento, según la órbita y posición que ocupa en c-lla, según el número de catálogo NASA, según la identificación internacional constituida por el año de lanzamiento o según la asignación PRN (*Pseudo Random Noise*), ruido pseudoaleatorio identificativo de la señal de cada satélite (Tabla 2.2).

La constelación GPS se ha desplegado en 6 planos orbitales casi circulares designados con las letras *A – F*. La inclinación de los planos orbitales es de  $55^\circ$  respecto al plano ecuatorial. Cada posición del satélite en la órbita se identifica por un número. En principio había 4 satélites por órbita uniformemente distribuidos en ascensión recta, pero actualmente hay un incremento de un satélite, en algunas órbitas, para eliminar las zonas de baja cobertura para navegación. También habrán otros satélites en órbita de aparcamiento, desactivados y disponibles como reserva [16].

Las órbitas tienen una excentricidad de 0,02 y su semieje mayor mide, aproximadamente, 26700 kilómetros, es decir están a una altitud de unos 20200 kilómetros. De esta manera, de acuerdo a la tercera ley de Kepler las órbitas tienen un periodo de 11 horas y 56 minutos.

Con la actual constelación hay en cualquier instante y cualquier punto de la Tierra entre 6 y 11 satélites observables. El tiempo máximo de observación de un satélite es de hasta 4 horas y cuarto, suponiendo que se observe con  $15^\circ$  de elevación sobre el horizonte [12].

Las funciones básicas de los satélites son: recibir y almacenar información transmitida por el segmento de control; procesar dicha información con sus microprocesadores; mantener la escala de tiempo con sus osciladores y transmitir información a los usuarios a través de varias señales.

El oscilador de cada satélite genera una única frecuencia fundamental  $f_0 = 10,23\text{MHz}$ , sobre la que se estructura todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite. A partir de ellas se generan las dos portadoras de las señales transmitidas por los satélites, la Link1 (L1) y la Link 2 (L2).

Multiplicando dicha frecuencia por 154 obtendremos la frecuencia de la portadora Link 1 (L1),

$$L1 = 154 \times 10,23 = 1575,42 \text{ MHz},$$

Bloque	PRN	Número SVN	Fecha lanzamiento	Plano orbital
II	17	17	11-Diciembre-1989	D-3
II	21	21	02-Agosto-1990	E-2
II	15	15	01-October-1990	D-5
IIA	24	24	04-Julio-1991	D-1
IIA	25	25	23-Febrero-1992	A-2
IIA	26	26	07-Julio-1992	F-2
IIA	27	27	09-Septiembre-1992	A-4
IIA	01	32	22-Noviembre-1992	F-4
IIA	29	29	18-Diciembre-1992	F-5
IIA	31	31	30-Marzo-1993	C-3
IIA	07	37	13-Mayo-1993	C-4
IIA	09	39	26-Junio-1993	A-1
IIA	05	35	30-Agosto-1993	B-4
IIA	04	34	26-October-1993	D-4
IIA	06	36	10-Marzo-1994	C-1
IIA	03	33	28-Marzo-1996	C-2
IIA	10	40	16-Julio-1996	E-3
IIA	30	30	12-Septiembre-1996	B-2
IIA	08	38	06-Noviembre-1997	A-3
IIR	13	43	23-Julio-1997	F-3
IIR	11	46	07-October-1999	D-2
IIR	20	51	11-Mayo-2000	E-1
IIR	28	44	16-Julio-2000	B-3
IIR	14	41	10-Novierabre-2000	F-1
IIR	18	54	30-Enero-2001	E-4
IIR	16	56	29-Enero-2003	B-1
IIR	21	45	31-Marzo-2003	D-3
IIR	22	47	21-Diciembre-2003	E-2
IIR	19	59	20-Marzo-2004	C-3
IIR	23	60	23-Junio-2004	F-4
IIR	02	61	06-Noviembre-2004	D-7

Tabla 2.2: Satélites actuales operativos



y multiplicando por 126 tendremos la frecuencia de Link 2 (**L2**),

$$L2 = 126 \times 10,23 = 1227,60 \text{ MHz.}$$

La longitud de onda de la señal L1 es de 19,05 cm. y la de L2 es de 24,43 cm. La señal se emite en dos frecuencias para corregir el retardo ionosférico producido en la propagación de la señal como veremos más tarde.

Para que cualquier onda electromagnética transmita información debe ser modulada. El sistema GPS utiliza dos técnicas de modulación. La primera de ellas es la *módulo-2*, que consiste en la combinación de dos datos binarios en uno sólo

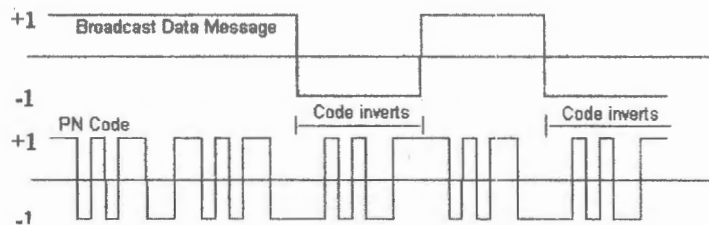


Figura 2.1: Modulación Módulo-2

Otro tipo de modulación sería la llamada *bifase (BPHK) (Biphase Hift Keying)*, consistente en un cambio de  $180^\circ$  en la fase de la onda cuando existe un cambio en los datos binarios. Esta modulación es la más adecuada si se desea calcular a partir de la señal la distancia recorrida desde el satélite al receptor. Además el uso de esta modulación permite identificar un satélite de otros simultáneamente presentes en la antena del receptor, ocultar información mediante el ensanchamiento del espectro transmitido siendo accesible únicamente al usuario que tenga la clave.

Las señales L1 y L2 se encuentran moduladas por dos códigos y el llamado mensaje de navegación, que da la información de los parámetros orbitales del satélite. Los códigos consisten en una secuencia de los estados +1 y -1, que corresponden a los valores binarios 0 y 1, respectivamente y que son generados por unos algoritmos matemáticos. Entre los códigos y el mensaje de navegación se utiliza la modulación módulo-2 suma (Figura 2.2).

Los códigos tienen como misión principal la de servir como marca temporal para la medida de tiempo que tarda la onda en viajar desde el satélite hasta el receptor y poder posteriormente determinar la distancia entre ellos. Estos códigos, son grupos de secuencias binarias que produce un ruido aleatorio (PRN, Pseudo Random Noise), característico y exclusivo de cada satélite que puede correlarse con la réplica que realiza nuestro receptor de él. Cada satélite emite continuamente dos códigos, el P y el C/A que como ya he dicho, le son propios.

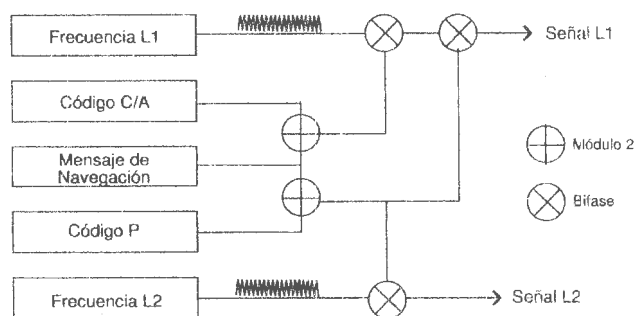


Figura 2.2: Generación de las señales GPS

El código C/A (*Coarse/Adquisition*) tiene una longitud de un milisegundo, y como tiene una frecuencia de 1,023 Mhz. entonces se trata de una secuencia de 1023 bits. La correspondiente longitud de onda es de 300 m. aproximadamente. Sólo es transmitido en la portadora L1 y es el observable básico para los usuarios civiles.

El código P (*Precise*) tiene una frecuencia de 10,23 MHz., es decir, una secuencia de 10,23 millones de dígitos binarios cada segundo, y tiene una longitud de onda de aproximadamente 30m. Este código es extremadamente largo, 38 semanas, pero cada uno de los satélites transmite porciones únicas de 7 días de este código, inicializándose a cero cada semana, en la medianoche del Sábado al Domingo. El código P se encuentra en ambas frecuencias, y sólo pueden acceder a él los receptores que sean autorizados.

Los códigos sirven fundamentalmente para el posicionamiento absoluto y son usados principalmente en navegación, como veremos más tarde. El código C/A ofrece precisiones nominales decamétricas y se usa en el posicionamiento estándar SPS (*Standard Positioning Service*). El código P ofrece precisiones nominales métricas y se usa en el posicionamiento preciso PPS (*Precise Positioning Service*).

Además de por los dos códigos las ondas portadoras L1 y L2 están moduladas por el llamado mensaje de navegación, que consta de 25 grupos de 1500 bits cada uno y divididos en cinco subestructuras. Cada grupo se transmite con una frecuencia de 50 Hz. y tarda 30 segundos. Esto supone que el mensaje modulado completo sobre ambas portadoras tiene una duración de 12 min. 30 seg.

Las cinco subestructuras de seis segundos de duración cada una proporcionan al usuario información sobre las efemérides predichas para los satélites <sup>2</sup>, correcciones modelizadas para actualizar el efecto ionosférico en la propagación de la señal, error del reloj y estado de funcionamiento de cada satélite [8][1].

Cada subestructura contiene 10 palabras de 30 bits cada una. Las primeras dos palabras de cada

<sup>2</sup>Las efemérides son las predicciones de la posición actual de los satélites, transmitidas en el mensaje de navegación



subestructura son TLM (Telemetry Word) y HOW (Hand Over Word). La palabra TLM contiene un sincronizador que facilita el acceso al mensaje de navegación y HOW se utiliza para pasar del código C/A al código P.

La Subestructura 1 tienen 300 bits, almacena los parámetros de corrección del reloj  $a_0$  (estado del reloj),  $a_1$  (deriva) y  $a_2$  (variación de la deriva), proporcionando al usuario información sobre el estado del tiempo del satélite con respecto al tiempo GPS. Los parámetros de corrección del reloj son actualizados cada hora, desde el centro de control, que veremos más tarde.

Incluye también los parámetros  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_0, \dots, \beta_3$  que proporcionan información sobre el modelo ionosférico y permiten calcular los retardos ionosféricos producidos en la propagación de la señal. Una palabra de 8 bits, AODC (*Age of Data Clock*), indica el instante de actualización de los datos contenidos en este bloque para cada satélite. Las Subestructuras 2 y 3 contienen en 600 bits las efemérides del satélite, predichas desde el segmento de control e inyectadas al satélite cada hora. Las efemérides contienen un conjunto de parámetros que comprende no sólo los elementos orbitales keplerianos, sino también las correcciones de los mismos. Así engloban la anomalía media en el instante de referencia,  $M_0$ ; variación del movimiento medio,  $\Delta n$ ; excentricidad,  $e$ ; raíz cuadrada del semieje mayor de la órbita; ascensión recta del nodo ascendente en el instante de referencia,  $\Omega_0$ ; inclinación de la órbita en el instante de referencia,  $i_0$ ; argumento del perigeo,  $\omega$ ; y las distintas correcciones. Con todos estos datos y a través de un algoritmo podemos obtener las coordenadas de los satélites [12].

Esta subestructura incluye el parámetro *AODE* (*Age of Data Ephemerides*), de 14 bits, que indica el instante de la última medida que se utilizó para estimar dichas efemérides.

La Subestructura 4 son 300 bits reservados para mensajes especiales y sólo tienen acceso determinados usuarios. Se trata de un mensaje alfanumérico, que se repite de forma periódica cada 25 mensajes. Sirve, por ejemplo, para difundir los parámetros de un modelo de corrección ionosférica.

Por último, la Subestructura 5 contiene el almanaque de datos de un satélite en 300 bits. El almanaque es utilizado por el receptor para una identificación rápida de qué satélites están visibles, para el cálculo aproximado de la configuración geométrica óptima y para seleccionar el intervalo de tiempo de observación. El total de datos del almanaque excede de la capacidad de una única subestructura, de manera que es transmitido sobre una página rotatoria, completándose al cabo de tantas subestructuras como satélites de la constelación existan.

Si denotamos una onda sin modular como  $S(t) = A \cos(2\pi ft)$  entonces la estructura definitiva de nuestras señales teniendo en cuenta que L1 ha sido modulada por ambos códigos y que L2 sólo por el código P será:

$$\begin{aligned} S_{L1}(t) &= A_1 P_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_1 t) + A_1 C_i(t) D_i(t) \sin(2\pi f_1 t), \\ S_{L2}(t) &= A_2 P_i(t) D_i(t) \cos(2\pi f_2 t). \end{aligned} \quad (2.1)$$

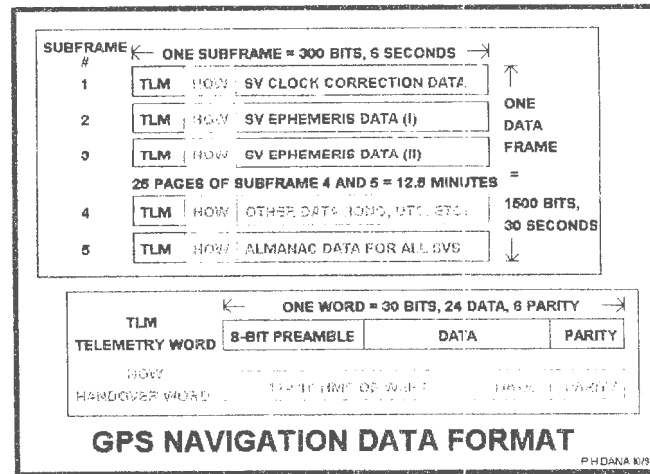


Figura 2.3: Contenido del mensaje de navegación.

donde

$A_1, A_2$ : amplitudes de las señales

$P_i(t)$ : secuencia del código P con estado  $\pm 1$

$C_i(t)$ : secuencia del código C/A con estado  $\pm 1$

$D_i(t)$ : mensaje de navegación

$f_1, f_2$ : frecuencias de las portadoras, respectivamente.

El número  $i$  denota el número PRN del satélite, característico de cada satélite.

### 2.1.2. El segmento de control

Los satélites del sistema son seguidos desde la Tierra por una serie de estaciones situadas estratégicamente a lo largo del globo terráqueo. Su función es responsabilizarse del funcionamiento y operatividad del sistema, y establecer la base de tiempo de dicho sistema. Está constituido por tres tipos de estaciones: Estación master, estaciones de control y estaciones de seguimiento.

La estación de control Master (*Master Control Station*) está situada en Colorado Springs. Su misión es recopilar la información suministrada por todas las demás, para determinar las efemérides, almanaques y toda aquella información que ha de ser transmitida y almacenada en la memoria de cada satélite. En ella se calculan los coeficientes correctivos sobre los relojes atómicos que deben transmitir los propios satélites en el mensaje de navegación.

Las estaciones de control (*Monitor Stations*) son tres y están situadas en las islas de Diego García (Océano Índico), de Ascensión (Atlántico Sur) y Kwalahein (Pacífico Occidental). Se utilizan para inyectar en los satélites los datos calculados por la estación de control Master.

Las estaciones de seguimiento son cinco, cada una de las cuatro anteriores tiene su estación de

seguimiento, y además hay otra situada en el archipiélago de Hawaii (Pacífico Oriental).



Figura 2.4: Estaciones de control y seguimiento

Con relojes de Cesio y recibiendo continuamente en las dos frecuencias las señales de todos los satélites mientras estén sobre el horizonte se obtiene la información necesaria para determinar las órbitas de los diferentes satélites. Todos estos datos se envían a la estación master, donde se realizan los cálculos. También registran datos meteorológicos para evaluar modelos troposféricos. Todas las estaciones tienen coordenadas obtenidas con el sistema VLBI, sistema interferométrico de posicionamiento más preciso que el GPS. La necesidad de conocer las coordenadas de estas estaciones con mayor precisión de la que ofrece el sistema GPS, se debe a que son ellas las que calculan las posiciones de los satélites, además de los estados de los relojes.

### 2.1.3. El segmento usuarios

Este sector lo compone el instrumental que debe 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 del segmento de usuarios son el equipo de observación y el software del procesamiento de los datos, que puede ser objeto de uso tras la campaña de observación, o bien en el instante de la observación. La comunicación entre el segmento espacial y el de control se establece en los dos sentidos, mientras que el sector usuario no se relaciona con el segmento de control, únicamente tiene acceso al segmento espacial a través de las señales emitidas por los satélites.

El equipo receptor GPS es un entorno integrado de elementos diseñado para recibir y procesar señales de satélites de forma simultánea o secuencial. Básicamente consta de una antena, un procesador interno que entre otras funciones puede generar réplicas del código P o del código C/A, un oscilador de precisión, una unidad de almacenamiento, una unidad de control, elementos auxiliares (Figura 2.5).

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. El procesador interno o sensor recibe los impulsos de la antena receptora y

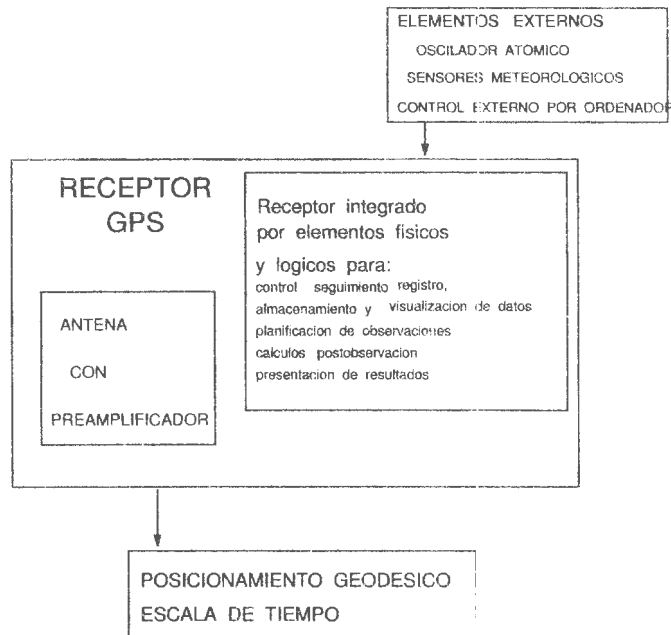


Figura 2.5: Componentes de un receptor GPS.

reconstruye e interpreta los componentes de la señal, es decir, las portadoras, los códigos y el mensaje de navegación.

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. Para obtener las medidas de fase el sensor reconstruye éstas por modulación bifase-binaria de los códigos modulados en ellas [26].

Dada la variedad de equipos y sus constantes modificaciones por las diferentes casas comerciales nos limitaremos a clasificarlos: según la arquitectura de construcción o según la señal. Así, según su arquitectura existen receptores multicanales asignándose un canal para cada satélite y multiplexados, donde la asignación de cada canal es compartida entre varios satélites; y basados en las señales, se dividen en receptor de una frecuencia (L1) y en receptores bifrecuencia (L2) [20].

## 2.2. Modos de posicionamiento

El objetivo fundamental del GPS es dotar de coordenadas a estaciones situadas en la Tierra. Según los requisitos de precisión y los resultados que obtengamos podemos dividir los tipos de posicionamiento en dos clases:

1. Según el sistema de referencia: En donde nos encontramos con el posicionamiento absoluto y el relativo.

2. Según el movimiento del receptor: Estático y cinemático.

### 2.2.1. Posicionamiento absoluto

Un posicionamiento es absoluto cuando se determinan las coordenadas respecto a un sistema de referencia terrestre local o global previamente definido tras una transformación matemática a partir de las coordenadas obtenidas en el sistema cartesiano geocéntrico del GPS, el WGS-84.

Dicho posicionamiento se realiza con un único receptor, y consiste en la solución de una intersección directa de todas las pseudo-distancias satélite-receptor sobre la estación en un período de observación dado. Se trata de un método directo.

El observable utilizado para el posicionamiento absoluto es la medida de pseudodistancia ya sea procedente del código C/A ó del código P. Para resolver un posicionamiento absoluto es necesario recibir 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 el estado del reloj del receptor). Esto está garantizado gracias a la configuración de la constelación NAVSTAR.

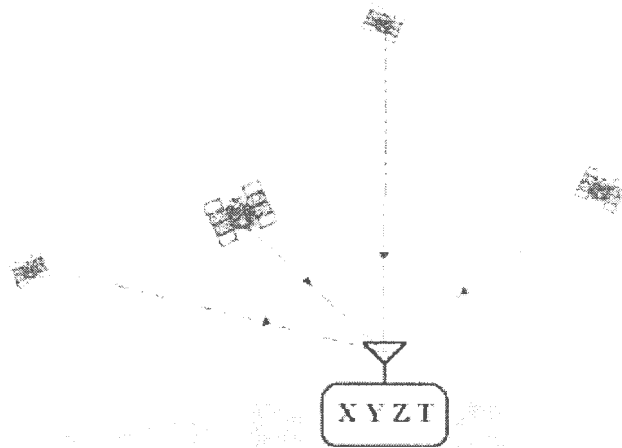


Figura 2.6: Posicionamiento absoluto.

Este posicionamiento tiene la ventaja de que con un sólo instrumento de observación podemos obtener nuestra posición, pero posee una serie de inconvenientes que repercuten en la precisión de la misma, y por ello no hace de este método una aplicación apropiada en trabajos de precisión.

Dependiendo del código que utilicemos y de la disponibilidad selectiva obtendremos una precisión que variará de 15 a 100 metros. Pero gracias a los últimos avances tecnológicos y a la desaparición de la disponibilidad selectiva existen receptores que alcanzan precisiones de 3-5 metros. Este posicionamiento es el utilizado por los equipos llamados navegadores. A dicho posicionamiento absoluto se le suele denominar solución de navegación.

### 2.2.2. Posicionamiento relativo

Cuando se requieren precisiones mayores se utiliza el posicionamiento relativo, el cual será mejor o peor en función del instrumental utilizado y la técnica a la que se recurra.

El posicionamiento relativo consiste en realizar observaciones simultáneas de satélites desde al menos dos estaciones, una de ellas se tomará como referencia, apareciendo el concepto de *baselinea* (vector que une el punto de referencia y el punto objetivo).

En dicho posicionamiento se ven involucrados, como se ha dicho, al menos dos equipos en recepción simultánea de los mismos satélites. No se obtienen las coordenadas GPS que ofrece el sistema, sino los incrementos de coordenadas entre las antenas de ambos receptores, o sea la diferencia de posición entre ellos. Este incremento de coordenadas vendrá dado en el sistema geocéntrico de coordenadas.

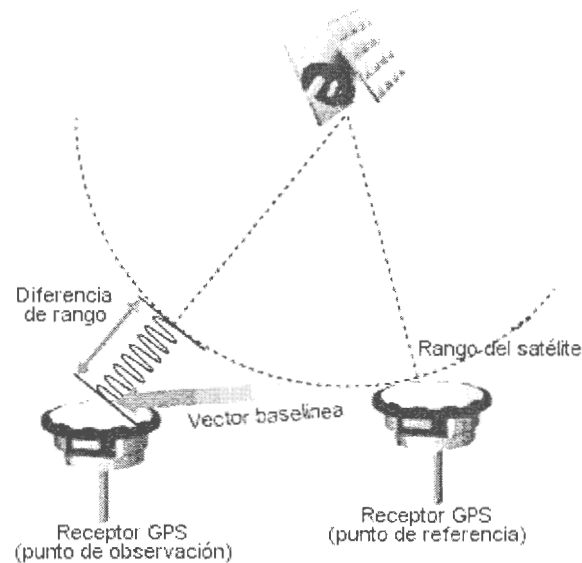


Figura 2.7: Posicionamiento relativo o diferencial.

De los dos receptores, uno es el que establece el origen del sistema local de referencia y se posiciona el otro receptor mediante los incrementos de coordenadas  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ .

La gran ventaja de este método de posicionamiento es que los errores de posicionamiento son muy similares o comunes en ambos puntos y no tienen influencia en los incrementos de coordenadas. Para resolver las coordenadas se recurre a los algoritmos de simples, dobles y triples diferencias, que veremos posteriormente, con lo que se consigue eliminar gran parte de los errores que afectan a la observación:

- Retardo ionosférico.

- Retardo troposférico.
- Error en el reloj del satélite.
- Error en las efemérides.

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 con el que estamos trabajando.

Dentro del método relativo y atendiendo al tipo de observables, instrumental de observación y software de cálculo utilizados podemos citar las siguientes técnicas de posicionamiento relativo: estáticos, cinemáticos y diferencial.

### **Método estático**

El método estático consiste en el establecimiento de receptores que no varían su posición durante la etapa de observación. Se utiliza para distancias largas (mayor que 20 Km.). La estación de referencia puede establecerse en cualquiera de los dos puntos y la precisión será en función del tiempo de observación, de la geometría de la constelación observada y del instrumental utilizado.

Dicho método 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 los 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 o proyectos de ingeniería.
- Obtención de puntos de apoyo fotogramétrico.
- Control de deformaciones en superficies y estructuras.
- Proyectos de investigación sobre el comportamiento y estructura de la atmósfera terrestre, estudio de precisiones,...

El método estático tiene la ventaja de que siempre se puede recurrir a él 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 relativos.



### Método cinemático

El método cinemático se ocupa de la determinación de coordenadas, en instantes sucesivos, de posiciones ocupadas por un móvil terrestre, marítimo o aéreo. Este método constituye una solución eficaz al inconveniente de los posicionamientos estáticos que requerían períodos de observación prolongados.

El fundamento es establecer una estación fija de referencia, estática, y otra móvil que va a realizar las puestas en los puntos que se consideren necesarios a levantar, permaneciendo en ellos aproximadamente unos minutos.

Para desarrollar este método es necesaria una inicialización, que supone calcular todos los parámetros de la base que une el móvil y la referencia en un instante. Una vez hecho esto, se conservan dichos valores, 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.

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, y además no es un método válido en distancias superiores a 20 kilómetros. En dicho caso habrá que efectuar de nuevo la inicialización o volver al último punto levantado. Es por ello que debe mantenerse siempre el contacto con los satélites.

Dentro del modo cinemático, se puede trabajar con el modo continuo o en modo discontinuo.

### Método GPS Diferencial

El método GPS diferencial (DGPS) se utiliza para dotar de coordenadas absolutas a estaciones móviles o estáticas, a partir de una estación fija de coordenadas conocidas. Este método consiste en la transmisión, vía radio, desde la estación principal de las correcciones diferenciales, entre las coordenadas absolutas a priori de dicha estación y las obtenidas en cada instante mediante medidas de código.

Los resultados obtenidos con este método de posicionamiento son excelentes en muchos de los casos, siendo mejores en distancias de 200 Kilómetros. 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.

Las aplicaciones más comunes del DGPS son

- Navegación de precisión.
- Confeción y actualización de sistemas de información geográfica.



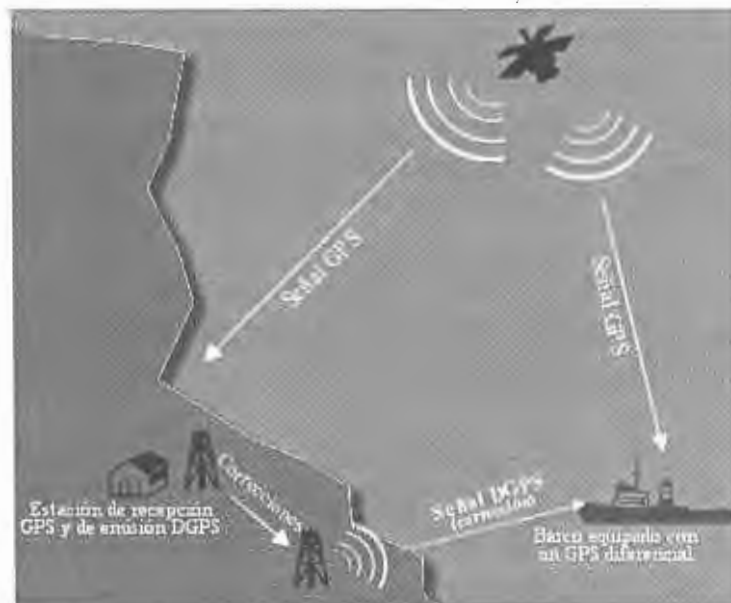


Figura 2.8: Posicionamiento GPS Diferencial.

- Levantamientos y apoyo para la cartografía.
- Todo trabajo en general que no requiera precisiones mayores de 0.3-0.5 metros.

## 2.3. Observables GPS

Definido el entorno en el que se sitúa el sistema GPS es necesario que se definan los datos con los que se van a trabajar: los observables GPS. Dichos observables son deducidos a partir de medidas de tiempo o de diferencia de fase y están basados en la comparación entre la señal recibida en el receptor y la generada en el mismo. Los observables GPS son la pseudodistancia y la fase de la portadora.

La pseudodistancia tiene una menor precisión que la fase de la portadora a la hora de determinar la posición geocéntrica del receptor o la posición relativa entre dos o más estaciones. Las técnicas basadas en pseudodistancia conducen a receptores sencillos y son utilizadas en navegación. En trabajos de alta precisión el observable utilizado es la fase de la portadora, que permite obtener precisiones del orden del milímetro.

La combinación de estos observables básicos da lugar a observables adicionales que proporcionan ciertas ventajas en la resolución de problemas geodésicos y geodinámicos. Antes de definir dichos observables, veamos primero la relación existente entre el tiempo, la frecuencia y la fase en una señal generada por un oscilador.

### 2.3.1. Frecuencia, tiempo y fase de una señal

Un oscilador es un dispositivo electrónico capaz de emitir pulsos a una determinada frecuencia. Resulta imposible construir un oscilador perfecto con una frecuencia nominal  $f_0$ . La frecuencia instantánea generada por un oscilador viene dada por la derivada de la fase de la señal,  $\phi(t)$ , respecto al tiempo

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$$

y recíprocamente la fase de la señal en un instante  $t$  es la integral de la ecuación anterior entre un instante inicial  $t_0$  y el instante considerado

$$\phi(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt + \phi(t_0)$$

donde  $\phi(t_0)$  es la fase en el instante inicial. La fase de la señal se mide en unidades de ciclo, y la frecuencia en Hercios(Hz) o ciclos por segundo.

La fase de una señal puede ser convertida en tiempo, haciendo la diferencia de fase registrada por el oscilador entre los instantes  $t_0$  y  $t$ , y dividiendo por la frecuencia nominal del oscilador  $f_0$

$$t(t) - t(t_0) = \frac{\phi(t) - \phi(t_0)}{f_0} = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (2.2)$$

donde  $t(t)$  es el tiempo nominal producido por un oscilador a partir de la fase en el instante  $t$  y  $t(t_0)$  es el tiempo nominal producido por el oscilador a partir de la fase en el instante  $t_0$ .

Suponiendo que el oscilador fuese perfecto, lo que equivale a decir que su frecuencia nominal es constante  $f(t) = f_0 = cte$ , la ecuación anterior resultaría

$$t(t) - t(t_0) = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t f_0 dt = t - t_0$$

es decir, que la diferencia de tiempos obtenida a partir de las fases registradas coincidiría con el tiempo realmente transcurrido. Dispondríamos de un reloj perfecto. Esta situación hipotética no es posible, debido a la inestabilidad de la frecuencia de los osciladores.

El comportamiento de un oscilador se describe como la siguiente función [20].

$$f(t) = f_0 + \delta f(t)$$

donde el término  $\delta f(t)$  engloba el desplazamiento de la frecuencia del oscilador. Introduciendo dicha función en la ecuación (2.2) obtenemos

$$t(t) - t(t_0) = \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t (f_0 + \delta f(t))dt$$

$$t(t) = t(t_0) + (t - t_0) + \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t \delta f(t)dt = t + (t(t_0) - t_0) + \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t \delta f(t)dt$$

y llamando

$$dt = (t(t_0) - t_0) + \frac{1}{f_0} \int_{t_0}^t \delta f(t) dt$$

al término del error que varía con el tiempo, llegamos a

$$t(t) = t + dt(t) \quad (2.3)$$

que nos expresa que cualquier tiempo derivado de un oscilador es igual al tiempo real más un cierto error que varía con el tiempo. La magnitud de este error depende de la estabilidad de la frecuencia generada por el oscilador.

Para el caso del sistema GPS, el error del oscilador del satélite es mantenido por el segmento de control e introducido en el mensaje de navegación mediante 3 coeficientes y el tiempo  $t_0$  de forma que para un satélite sea dicho error como

$$dt(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

siendo  $t$  el instante de la observación.

### 2.3.2. Pseudodistancia

La pseudodistancia es la medida de la distancia entre el satélite y la antena del receptor en la época de transmisión y recepción de los códigos, obtenida a partir del tiempo de vuelo de la señal multiplicado por la velocidad de la luz. Consideremos un receptor  $i$  y un satélite  $k$ , en un instante cualquiera el satélite emite una determinada marca de tiempo, y el receptor repite, simultáneamente, dicha marca de forma que, cuando le llega la que ha emitido el satélite, las compara y determina el tiempo  $\delta t$  que ha tardado en recibirla.

Debido a que los osciladores del satélite y del receptor no están exactamente sincronizados, puesto que existe un estado relativo entre ambos relojes distinto de cero, la pseudodistancia difiere de la distancia geométrica correspondiente a la época de emisión y recepción. Denotemos por  $t^k$  y por  $t_i$  las lecturas de los osciladores en el satélite  $k$  y en el receptor  $i$  en los instantes de emisión y recepción respectivamente de los códigos.

Ambos osciladores tienen algún desfase con respecto al sistema de tiempo GPS. Sean  $dt^k(t)$  y  $dt_i(t)$  dichos desfases, entonces  $t^k(t) = t^k(GPS) + dt^k(t)$ , y  $t_i(t) = t_i(GPS) + dt_i(t)$ .

La diferencia de las dos lecturas anteriores es equivalente al desplazamiento de tiempo (*time shift*,  $\Delta t$ ) que alinea la señal del satélite y la generada en el receptor (figura 2.9)

$$\Delta t = t^k(t) - t_i(t) = t^k(GPS) + dt^k(t) - [t_i(GPS) + dt_i(t)] = \Delta t(GPS) + [dt^k(t) - dt_i(t)]$$

y multiplicando por la velocidad de la luz en el vacío tendremos que

$$c \cdot \Delta t = c\Delta t(GPS) + c[dt^k(t) - dt_i(t)]$$

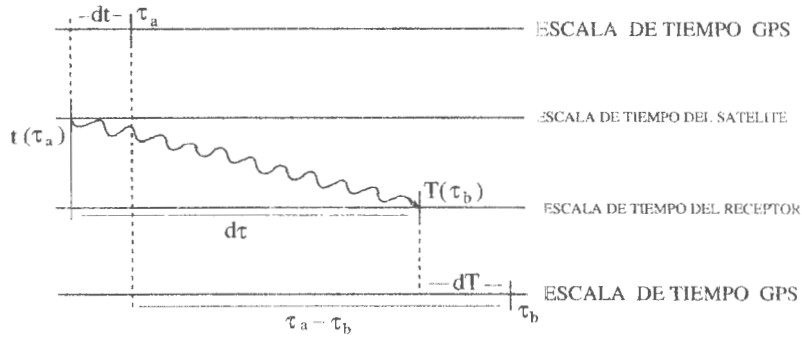


Figura 2.9: Errores en los osciladores [1].

La señal emitida por los satélites se propaga por la atmósfera, que debido a su carácter dispersivo, producirá un retardo en la llegada de la señal al receptor. Además existen otros tipos de retardos, los producidos por la presencia de cuerpos reflectantes en las proximidades de la estación y los debido a la propia electrónica del receptor y del satélite. Con todos ellos el modelo matemático de la pseudodistancia vendrá dado por

$$R_i^k(t) = c \cdot \Delta t = c\Delta t(GPS) + c[dt^k(t) - dt_i(t)] + cdt_{atmos}(t) + cdt_{retardos}(t) = \rho_i^k(t) + c[dt^k(t) - dt_i(t)] + I_i^k(t) + T_i^k(t) + \epsilon_i^k, \quad (2.4)$$

donde  $I_i^k(t)$  y  $T_i^k(t)$  denotan el retardo producido por la ionosfera y la troposfera, respectivamente -únicas capas de la atmósfera que producen una desviación de la señal-,  $\rho_i^k(t)$  denota la distancia geométrica estación-satélite, es decir, la distancia entre la posición del satélite en la época  $t^k(GPS)$  y la posición del receptor en la época  $t_i(GPS)$ , y  $\epsilon_i^k$  es una corrección en ruido de carácter aleatorio. Los retardos producidos por las posibles reflexiones de la señal y la electrónica del receptor se consideran errores de carácter aleatorio y quedan incluidos dentro del término  $\epsilon_i^k$ .

Si denotamos por  $r_i$  y  $r^k$  a los vectores de posición del receptor y del satélite, respectivamente conocemos las coordenadas del satélite, dadas en el mensaje de navegación, entonces

$$\rho_i^k(t) = \|r^k(t) - r_i(t)\| = \sqrt{(x^k(t) - x_i(t))^2 + (y^k(t) - y_i(t))^2 + (z^k(t) - z_i(t))^2}$$

donde  $(x^k(t), y^k(t), z^k(t))$  y  $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$  son las coordenadas geocéntricas del satélite y del receptor. Con todo ello el modelo de la pseudodistancia resulta

$$R_i^k(t) = \|r^k(t) - r_i(t)\| + c[dt^k(t) - dt_i(t)] + I_i^k(t) + T_i^k(t) + \epsilon_i^k = \sqrt{(x^k(t) - x_i(t))^2 + (y^k(t) - y_i(t))^2 + (z^k(t) - z_i(t))^2} + c[dt^k(t) - dt_i(t)] + I_i^k(t) + T_i^k(t) + \epsilon_i^k, \quad (2.5)$$

donde las incógnitas son las coordenadas cartesianas del receptor y el retardo  $dt_i(t)$ , ya que el error del reloj del satélite,  $dt^k(t)$  es calculado por el segmento de control.

La distancia  $\rho_i^k(t)$  entre el receptor  $i$  y el satélite  $k$  no es una función lineal de las coordenadas del receptor, con lo cual el problema es difícil de resolver y utilizando la linealización como aproximación, se obtiene un desarrollo en serie de Taylor en torno a unas coordenadas aproximadas del receptor [1].

### 2.3.3. Fase de la portadora

La medida de la fase de la portadora resulta de la comparación de la fase de la señal portadora recibida en el receptor y la generada por el oscilador de dicho receptor. Aunque ambas son comparadas para un mismo instante  $t$ , cada una de estas fases es función del tiempo nominal del oscilador que la genera. Este método utiliza como observable básico la fase de onda resultante de reconstruir la portadora recibida, es decir, la portadora a la que le hemos quitado los mensajes que estaba transmitiendo.

El número entero de ciclos de la fase generada por el receptor es una cantidad entera aleatoria cada vez que se enciende el receptor. A partir de ahí, el receptor mantiene, además de la medición de fase, un registro continuo de los ciclos completos que el satélite se aleja o se acerca. Es decir, que mediante el empleo de la fase de la onda portadora, el receptor es capaz de medir lo que el satélite se acerca o se aleja del receptor, pero no la distancia absoluta al mismo. Para poder hacerlo se introduce una función entera denominada ambigüedad,  $N_i^k(t_0)$ .

La ambigüedad es un valor entero que añadido a la observable de fase registrada por el receptor permite obtener una nueva pseudodistancia al satélite. Este valor es constante siempre que no se produzca un corte en la recepción de la señal.

Así la medida de la fase total de la portadora emitida en un cierto instante consta de un número de ciclos, una parte fraccional de ciclo y la mencionada ambigüedad. Teóricamente, la fase total multiplicada por la correspondiente longitud de onda proporciona la distancia receptor-satélite, si bien la ambigüedad habrá de ser resuelta para poder calcular las coordenadas del receptor.

Al igual que pasaba con la pseudodistancia, los osciladores del receptor y del satélite tienen un error con respecto al tiempo exacto, es decir, al considerar un satélite  $k$  y un receptor  $i$  expresamos  $t^k(t) = t^k(GPS) + dt^k(t)$ , y  $t_i(t) = t_i(GPS) + dt_i(t)$ , donde  $t^k(GPS)$  y  $t_i(GPS)$  representan el tiempo GPS y que de ahora en adelante los denotaremos por  $t$ ;  $t^k(t)$  y  $t_i(t)$  son las marcas de tiempo definidas por la medida de la fase de los osciladores del satélite y del receptor, respectivamente; y  $dt_i(t)$   $dt^k(t)$  son los errores de dichos osciladores.

Debido a la imposibilidad de saber el valor de la ambigüedad, el observable de la fase portadora es

$$\phi_{total} = \phi_{medida} + N(t_0) \quad (2.6)$$

y la fase de la portadora medida,  $\phi_{medida} = \phi_i^k(t)$ , se define como la diferencia entre la fase,  $\phi_i(t)$ ,

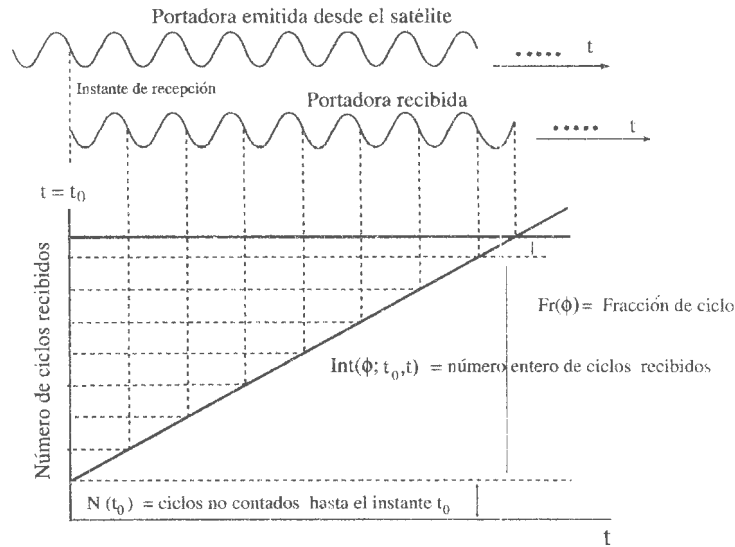


Figura 2.10: Fase de la portadora

generada por el oscilador del receptor  $i$  en el instante de recepción de la señal, es decir

$$\phi_i(t) = f_i t_i(t) + \phi_i(t_0) = f_i(t + dt_i(t)) + \phi_i(t_0), \quad (2.7)$$

y la fase,  $\phi^k(t - t_\rho)$ , de la señal generada por el satélite  $k$  en el instante de transmisión de la señal

$$\phi^k(t - t_\rho) = f^k(t^k(t) - t_\rho) + \phi^k(t_0) = f^k(t - dt^k(t)) - f^k t_\rho + \phi^k(t_0) \quad (2.8)$$

donde  $t_\rho$  es el tiempo que tarda la señal en recorrer la distancia satélite-receptor.

Teniendo en cuenta dichas ecuaciones la fase de la portadora medida es

$$\phi_{medida}(t) = \phi_i^k(t) = \phi_i(t) - \phi^k(t - t_\rho) = f_i(t + dt_i(t)) + \phi_i(t_0) - f^k(t - dt^k(t)) + f^k t_\rho - \phi^k(t_0)$$

La expresión anterior puede simplificarse si tenemos en cuenta que la estabilidad de los relojes atómicos es del orden de  $10^{-12}$ , por lo que a la frecuencia de la portadora le corresponde un desvío de  $df \simeq 1,5 \times 10^{-3}$  Hz., lo que durante el tiempo de propagación de la señal origina una pérdida del orden de  $10^{-4}$  ciclos. Como este valor está por debajo del nivel de ruido que es capaz de distinguir el sistema podemos considerar que las frecuencias de portadora del satélite y receptor son las mismas e iguales ambas a la frecuencia nominal  $f_0$  por lo cual

$$\begin{aligned} \phi_i^k(t) = \phi_i(t) - \phi^k(t - t_\rho) &= f_0(t + dt_i(t)) + \phi_i(t_0) - f_0(t - dt^k(t)) + f_0 t_\rho - \phi^k(t_0) = \\ &= f_0(dt_i(t) - dt^k(t)) + f_0 t_\rho + \phi_i(t_0) - \phi^k(t_0) + \epsilon_i^k \end{aligned} \quad (2.9)$$

Y teniendo en cuenta la ambigüedad, consideramos  $\phi_{total}(t) = \phi_i^k(t) + N_i^k(t_0)$  y la ecuación de observación para la fase total de la portadora viene dada por

$$\phi_{total}(t) = f_0(dt_i(t) - dt^k(t)) + f_0 t_\rho + \phi_i(t_0) - \phi^k(t_0) + N_i^k(t_0) + \epsilon_i^k \quad (2.10)$$



La ecuación esta expresada en ciclos, y multiplicando por la longitud de onda,  $\lambda = c/f_0$ , obtendremos la ecuación correspondiente a la fase medida de la portadora en unidades de longitud

$$\begin{aligned} \Phi(t)_i^k &= ct_{\rho} + \lambda(\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)) + c(dt_i(t) - dt^k(t)) + \lambda N_i^k(t_0) + \epsilon_i^k = \\ &\rho_i^k(t) + \lambda(\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)) + c(dt_i(t) - dt^k(t)) + \lambda N_i^k(t_0) + \epsilon_i^k \end{aligned} \quad (2.11)$$

El primer término del segundo miembro de la ecuación,  $\rho_i^k(t)$ , representa la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, el término  $\lambda(\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0))$  es constante y se trata de la fase inicial del oscilador del receptor y del satélite, y el cuarto término son los errores de los osciladores del satélite y del receptor, el quinto término representa la ambigüedad.

Al igual que en el caso de la pseudodistancia, a la fase total hay que añadirle una serie de términos debidos a las diversas fuentes de error y el modelo de la fase portadora es

$$\Phi(t)_i^k = \rho_i^k(t) + \lambda(\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)) + c(dt_i(t) - dt^k(t)) + \lambda N_i^k(t_0) - I_i^k(t) + T_i^k(t) + \epsilon_i^k \quad (2.12)$$

Obsérvese que en este caso, el signo del retardo ionosférico es negativo, al contrario que en la pseudodistancia. Las incógnitas o parámetros de este modelo son el error del oscilador del receptor, la ambigüedad inicial, la cual se mantiene constante para cada satélite mientras dure el proceso de observación desde el receptor, y las coordenadas geodésicas de la estación que aparecen en la distancia geométrica

#### 2.3.4. Combinaciones de la portadora entre receptores y satélites

Si bien los modelos anteriormente explicados de pseudodistancia y fase de la portadora son suficientes para posicionamientos absolutos que no requieren altas precisiones, como son la navegación, la topografía,..., no es así en geodesia, donde las grandes precisiones que se necesitan hacen necesario recurrir al posicionamiento relativo entre las estaciones que conforman una red geodésica, para a partir del establecimiento de estaciones fijas dotar a todas las estaciones de la red de coordenadas absolutas.

Para ello se utilizan combinaciones de la fase de la portadora que nos van a proporcionar grandes precisiones, ya que eliminan o reducen muchos de los efectos que limitan el sistema GPS. Se basa en la construcción de diferencias entre las medidas realizadas en diferentes estaciones o de diferentes satélites en un mismo instante o en instantes sucesivos.

#### Simple Diferencias

Conocido también como primera diferencia se define este modelo como la diferencia entre dos lecturas simultáneas de la fase de la portadora de un mismo satélite  $k$  en dos receptores diferentes,  $i$  y  $j$  (Figura 2.11), y cuya posición relativa trata de determinarse, es decir,

$$\phi_{i,j}^k(t) = \phi_i^k(t) - \phi_j^k(t) \quad (2.13)$$

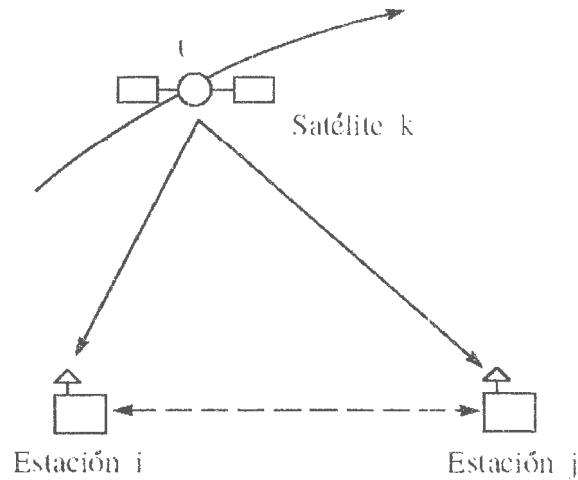


Figura 2.11: Simples diferencias

Las ecuaciones de observación para cada receptor vienen dadas por:

$$\phi_i^k(t) = \rho_i^k(t) + \lambda(\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)) + c(dt_i(t) - dt^k(t)) + \lambda N_i^k(t_0) - I_i^k(t) + T_i^k(t) + \epsilon_i^k(t)$$

$$\phi_j^k(t) = \rho_j^k(t) + \lambda(\phi_j(t_0) - \phi^k(t_0)) + c(dt_j(t) - dt^k(t)) + \lambda N_j^k(t_0) - I_j^k(t) + T_j^k(t) + \epsilon_j^k(t)$$

Y restando ambas expresiones

$$\begin{aligned} \phi_{i,j}^k(t) = \phi_i^k(t) - \phi_j^k(t) = & \rho_i^k(t) - \rho_j^k(t) + \lambda(\phi_i(t_0) - \phi_j(t_0)) + c(dt_i(t) - dt_j(t)) + \\ & \lambda N_i^k(t_0) + \lambda N_j^k(t_0) - I_i^k(t) + T_i^k(t) + I_j^k(t) - T_j^k(t) + \epsilon_i^k(t) - \epsilon_j^k(t) = \\ & \rho_{i,j}^k(t) + \lambda(\phi_{i,j}(t_0) + c(dt_i(t) - dt_j(t)) + \lambda N_{i,j}^k(t_0) - T_{i,j}^k(t) + I_{j,i}^k(t) + \epsilon_{i,j}^k(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

En dicho modelo desaparece el efecto de la fase inicial del oscilador del satélite y el error del oscilador del satélite con respecto al tiempo GPS. La determinación de la distancia geométrica entre los receptores y el satélite se efectúa a partir de las coordenadas del satélite en el instante  $t$  y las coordenadas aproximadas de cada una de los receptores, y como el error en las coordenadas del satélite es igual para ambas distancias, la cantidad  $\rho_{i,j}^k(t)$  solamente estará afectada por la diferencia en el error de las coordenadas aproximadas de ambos receptores.

Los errores de retardo ionosférico y troposférico prácticamente se cancelan para líneas cortas y condiciones troposféricas homogéneas. Por el contrario permanecen la ambigüedad en el instante inicial en ambos receptores.

También se conoce bajo esta denominación de simple diferencia de fase la ecuación obtenida por diferencia de dos ecuaciones procedentes de la observación simultánea desde un receptor  $i$  sobre dos satélites, en la cual desaparece el error del oscilador de la estación, pero se introduce el error del oscilador del nuevo satélite. El proceso de obtención de este modelo es análogo al realizado anteriormente.



### Dobles Diferencias

El siguiente paso es el proceso de las simples diferencias aplicado a dos satélites simultáneamente,  $k$  y  $l$ , desde los dos receptores que considerábamos antes. Se denomina doble diferencia a la diferencia de la simple diferencia. Para cada satélite observado desde ambos receptores las diferencias simples vienen dadas por:

$$\phi_{i,j}^k(t) = \rho_{i,j}^k(t) + \lambda(\phi_{i,j}(t_0) + c(dt_i(t) - dt_j(t)) + \lambda N_{i,j}^k(t_0) + T_{i,j}^k(t) + I_{j,i}^k(t) + \epsilon_{i,j}^k(t)$$

$$\phi_{i,j}^l(t) = \rho_{i,j}^l(t) + \lambda(\phi_{i,j}(t_0) + c(dt_i(t) - dt_j(t)) + \lambda N_{i,j}^l(t_0) + T_{i,j}^l(t) + I_{j,i}^l(t) + \epsilon_{i,j}^l(t)$$

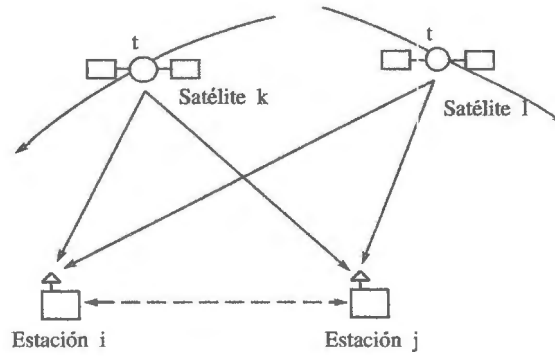


Figura 2.12: Dobles diferencias

Con la hipótesis de que la frecuencia de emisión de ambos satélites es igual, las dobles diferencias vienen dadas por

$$\begin{aligned} \phi_{i,j}^{k,l}(t) &= \phi_{i,j}^k(t) - \phi_{i,j}^l(t) = \rho_{i,j}^k(t) - \rho_{i,j}^l(t) + \lambda N_{i,j}^k(t_0) - \lambda N_{i,j}^l(t_0) \\ &+ T_{i,j}^k(t) - T_{i,j}^l(t) + I_{j,i}^k(t) - I_{j,i}^l(t) + \epsilon_{i,j}^k(t) - \epsilon_{i,j}^l(t) = \\ &\rho_{i,j}^{k,l}(t) + \lambda N_{i,j}^{k,l}(t_0) + T_{i,j}^{k,l}(t) + I_{j,i}^{l,k}(t) + \epsilon_{i,j}^{k,l}(t) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Obviamente, además de cancelarse la fase inicial del oscilador del satélite se cancelan aquellos con origen en los receptores y que son comunes, como son la diferencia de fase inicial en los osciladores, las desviaciones de los osciladores con respecto a la escala de tiempo GPS, aunque sigue presente el error debido a la ambigüedad inicial en ambas estaciones y las correcciones ionosféricas y troposféricas.

### Triples Diferencias

Hasta el momento sólo hemos considerado una época  $t$ . Ahora este nuevo modelo se basa en la diferencia de las dobles diferencias establecidas entre dos receptores y dos satélites y entre una

época  $t_1$  y la siguiente  $t_2$ .

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) = \phi_{i,j}^{k,l}(t_1) - \phi_{i,j}^{k,l}(t_2)$$

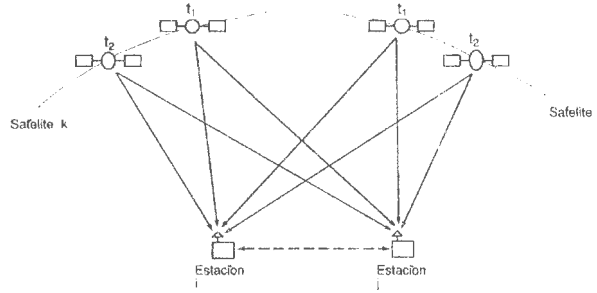


Figura 2.13: Triples diferencias

En un instante o época  $t_1$  se efectúa un proceso de dobles diferencias, y se obtiene

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t_1) = \phi_{i,j}^k(t_1) - \phi_{i,j}^l(t_1) = \rho_{i,j}^{k,l}(t_1) + \lambda N_{i,j}^{k,l}(t_0) + T_{i,j}^{k,l}(t_1) + I_{j,i}^{l,k}(t_1) + \epsilon_{i,j}^{k,l}(t_1) \quad (2.16)$$

y vemos que el segundo sumando del segundo miembro no depende del tiempo mientras no haya una pérdida de ciclos. Posteriormente en un instante  $t_2$ , volveremos a utilizar el modelo de las dobles diferencias, obteniendo

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t_2) = \phi_{i,j}^k(t_2) - \phi_{i,j}^l(t_2) = \rho_{i,j}^{k,l}(t_2) + \lambda N_{i,j}^{k,l}(t_0) + T_{i,j}^{k,l}(t_2) + I_{j,i}^{l,k}(t_2) + \epsilon_{i,j}^{k,l}(t_2) \quad (2.17)$$

Por lo tanto las triples diferencias serán

$$\begin{aligned} \phi_{A,B}^{k,l}(t_{1,2}) &= \rho_{i,j}^{k,l}(t_1) - \rho_{i,j}^{k,l}(t_2) + T_{i,j}^{k,l}(t_1) - T_{i,j}^{k,l}(t_2) + I_{j,i}^{l,k}(t_1) - I_{j,i}^{l,k}(t_2) + \epsilon_{i,j}^{k,l}(t_1) - \epsilon_{i,j}^{k,l}(t_2) = \\ & \rho_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) + T_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) + I_{j,i}^{l,k}(t_{1,2}) + \epsilon_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

La característica fundamental de las triples diferencias es que se cancela la ambigüedad de las dobles diferencias. La solución del problema se limita al cálculo de la situación relativa entre ambos receptores.

Por supuesto, la simplificación del problema tiene su contrapartida en la disminución de la precisión al hacer la combinación de una serie de resultados, problemas de redondeo aparecen al efectuar los cálculos. Por ello, las triples diferencias se suelen emplear en la fase de preprocesado, como veremos posteriormente.

### 2.3.5. Combinaciones de observables de fase

Existe la posibilidad de efectuar múltiples combinaciones a partir de los datos registrados en un receptor para conseguir nuevos observables con alguna propiedad interesante.

De forma general, la combinación de dos fases  $\phi_1$  y  $\phi_2$  viene definida por

$$\phi = n_1\phi_1 + n_2\phi_2$$

donde  $n_1, n_2$  son los factores que definen la combinación de observables y  $\phi_1, \phi_2$  son las fases de la portadora  $L_1$  y  $L_2$ , respectivamente. Como  $\phi = ft$ , si  $f$  es constante, sustituyendo

$$\phi = ft = n_1f_1t + n_2f_2t \Rightarrow f = n_1f_1 + n_2f_2$$

es decir, que la frecuencia del nuevo observable es combinación lineal de las frecuencias de los observables originales.

Como  $\lambda = \frac{c}{f}$ , la longitud de onda del nuevo observable se obtiene mediante

$$\lambda = \frac{c}{n_1f_1 + n_2f_2}$$

Entre las combinaciones más empleadas nos encontramos con la combinación de Ionosfera Libre (*free linear*,  $L_3$ ).

### Combinación de Ionosfera Libre.

La combinación de Ionosfera Libre o también llamada  $L_3$  se caracteriza por estar libre del retardo ionosférico, como veremos más adelante. Para ello tomamos  $n_1 = 1$  y  $n_2 = -\frac{f_2}{f_1}$ , es decir

$$\phi_{L_3} = \phi_1 - \frac{f_2}{f_1}\phi_2$$

Puede comprobarse, el inconveniente que presenta este observable es que la ambigüedad pierde el carácter de número entero, con lo que solamente permite obtener soluciones flotantes.

## 2.4. Errores del sistema GPS

La precisión que cabe esperar de las mediciones efectuadas sobre el GPS sólo puede estimarse analizando los diversos factores que pueden perturbar la medida o limitar las posibilidades del sistema.

En el posicionamiento geodésico mediante observaciones de satélites GPS intervienen los propios satélites, las estaciones de observación y el medio de propagación de la señal emitida por los satélites y recibida en la estación. Por tanto, los factores que limitan la precisión del posicionamiento GPS pueden compendiarse en la geometría de los satélites, la propagación de la señal en la atmósfera, las efemérides de los satélites, los errores de los osciladores de satélites y receptores, y el error debido al efecto relativista.

El conjunto de todos estos efectos se denomina error equivalente en distancia del receptor *Ranging Accuracy*. Algunos de ellos pueden ser modelados e incluso eliminados utilizando combinaciones apropiadas de los observables, como hemos visto, a partir de una o dos frecuencias, o trabajando en modo diferencial.

### 2.4.1. Geometría de los satélites observados

Si unimos el receptor con cada uno de los satélites que forman la constelación instantánea que estamos observando, obtenemos un prisma con vértice en el receptor, pero con una forma que cambia continuamente debido al movimiento de los satélites. La precisión de cada observación va a estar afectada por la forma y el volumen de cada una de esas figuras instantáneas.

El efecto de la configuración geométrica de los satélites está expresado por un parámetro, llamado *desviación de la precisión (DOP)*, valor adimensional relacionado con la geometría de la configuración de los satélites. El valor ideal es cerca de 1. Se calcula, en forma general, a partir de la matriz cofactor  $Q_x$  de la matriz  $A$  de los coeficientes  $Q_x = (A^T A)^{-1}$ .

El parámetro DOP engloba a un conjunto de coeficientes que nos proporcionan el error en la situación,  $\sigma$ , en función del error con que se efectúe la medida del observable,  $\sigma_0$ , o desviación típica a priori  $\sigma = DOP\sigma_0$ .

En función de la incógnita particular o combinación de incógnitas queelijamos tendremos diferentes formas de denominar a dicho coeficiente

- GDOP (*Geometric DOP*): Permite calcular el error en la medida de la situación completa, es decir, de la situación espacial del receptor y del error de su reloj. Se obtiene a partir de la traza de la matriz  $Q_x$ , la cual viene dada en función de la matriz de varianza-covarianza de las medidas

$$Q_x = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ & & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ & & & \sigma_{tt}^2 \end{pmatrix},$$

así pues,

$$GDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{tt}^2}. \quad (2.19)$$

- PDOP (*Position DOP*): Este coeficiente nos va a permitir calcular el error en la medida de la situación espacial del receptor. Su valor viene dado por  $PDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2}$ .
- TDOP (*Time DOP*): Es el coeficiente que corresponde al error en la solución del tiempo del receptor. Viene dado por  $TDOP = \sigma_{tt}$ .

- HDOP (*Horizontal DOP*): Es el coeficiente que nos va a dar el error en la situación en dos dimensiones, es decir sobre el plano tangente a la Tierra en el punto donde se encuentra el receptor.
- VDOP (*Vertical DOP*): Dicho coeficiente nos va a permitir calcular el error en la altitud obtenida sobre el geoide.

Debida a la baja velocidad relativa de los satélites estos coeficientes tienen una variación lenta, por lo que se considera que es suficiente con una actualización de sus valores cada quince minutos.

### 2.4.2. Propagación de la señal en la atmósfera

Al atravesar la atmósfera se ven sometidas a una serie de refracciones que curvan su trayectoria, con lo que su velocidad varía. Por lo cual es necesario efectuar una corrección por dichas refracciones, tanto en medidas observadas de la pseudodistancia como de la fase portadora. Las dos capas que afectan al recorrido de la onda son la ionosfera y la troposfera. A continuación se analizan ambos efectos.

#### Efecto ionosférico

El proceso que sufren las ondas al atravesar esta capa es aparentemente contradictorio. Mientras los códigos sufren un retraso, es decir, una disminución en su velocidad de propagación, las portadoras se adelantan, es decir, su velocidad aumenta. Posteriormente veremos que el efecto ionosférico es proporcional al contenido total de electrones (TEC).

Antes de continuar conviene definir los conceptos de índice de refracción y velocidad de fase y de grupo. La velocidad de fase es la velocidad con que se propaga la portadora  $v_f = f\lambda$ ; la velocidad de grupo es la velocidad con que se desplaza la información que contiene la portadora, en nuestro caso los códigos y mensaje de navegación,  $v_g = -\lambda^2 \frac{df}{d\lambda}$ ; y el índice de refracción de un medio nos da la relación entre la velocidad con que se propaga una onda en el vacío y la velocidad con que se propaga en dicho medio. Como hay dos velocidades, habrá dos índices de refracción, de fase  $n_f = \frac{c}{v_f}$  y de grupo  $n_g = \frac{c}{v_g}$ . La portadora se propaga a la velocidad de fase y la información viaja a la velocidad de grupo.

El hecho de que la ionosfera sea un medio dispersivo, produce variaciones dependientes de la frecuencia de emisión en las velocidades de grupo y de fase de la señal modulada y consecuentemente en el índice de refracción tanto de grupo como de fase.

Para el índice de refracción de la fase, se considera su desarrollo en serie [8], [1].

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots, \quad (2.20)$$

donde los coeficientes  $c_i$  no dependen de la frecuencia de emisión, pero si de la densidad existente de electrones en la ionosfera,  $D_e$ , a lo largo de la trayectoria de la señal. Utilizando una aproximación hasta el segundo orden y diferenciando

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} \Rightarrow dn_f = -\frac{2c_2}{f^3} df.$$

Ahora teniendo en cuenta como está definido el índice de refracción de grupo, tendremos

$$n_g = \frac{c}{v_g} = n_f + f \frac{dn_f}{df} = 1 + \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_2}{f^2} = 1 - \frac{c_2}{f^2}. \quad (2.21)$$

La determinación de la trayectoria seguida por las ondas viene dada por la ley de Snell  $s = \int n ds$ , y suponiendo que la propagación rectilínea viene dada por  $s_0 = \int ds_0$ , el retardo en la propagación vendrá dado por

$$\Delta I = \int n ds - \int ds_0, \quad (2.22)$$

y aplicado a nuestro caso, a lo largo del camino recto en el que  $s = s_0$

$$\Delta I_f = \int (n_f - 1) ds = \int \frac{c_2}{f^2} ds, \quad \Delta I_g = \int (n_g - 1) ds = - \int \frac{c_2}{f^2} ds.$$

Una estimación para el coeficiente  $c_2$  es  $-40,3D_e$ , por lo tanto

$$\Delta I_f = -\frac{40,3}{f^2} \int D_e ds, \quad \Delta I_g = \frac{40,3}{f^2} \int D_e ds. \quad (2.23)$$

Y por último definiendo el contenido total de electrones a lo largo de la trayectoria de la señal por  $TEC = \int D_e ds$ , obtenemos

$$\Delta I_f = -\frac{40,3}{f^2} TEC, \quad \Delta I_g = \frac{40,3}{f^2} TEC. \quad (2.24)$$

Como la dirección de propagación entre el satélite y el receptor solo será radial cuando el satélite esté en posición cenital, la variación de la velocidad de propagación dependerá, en general, del ángulo con el que la onda, en promedio, atraviese la capa (Figura 2.14)

$$\Delta I_f = -\frac{40,3}{f^2} \frac{TEC}{\cos z'}, \quad \Delta I_g = \frac{40,3}{f^2} \frac{TEC}{\cos z'},$$

que no coincide con la distancia cenital del satélite,  $z$ , al hacer la observación, siendo la relación entre ambas distancias cenitales de  $\sin z' = \frac{R}{R+h} \sin z$ , donde  $R$  es el radio medio de la Tierra y  $h$  la distancia media de la capa ionosférica.

Considerando que  $d_{ion} = I_i^k = \frac{40,3}{f^2} \frac{TEC}{\cos z'}$ , entonces las medidas de distancia mediante la pseudodistancia y la fase de la portadora vendrán dadas repectivamente por:

$$\rho_r = \rho_{medida} + d_{ion}, \quad \rho_\phi = \rho_{medida} - d_{ion} \quad (2.25)$$

El efecto ionosférico puede ser tratado de dos formas:

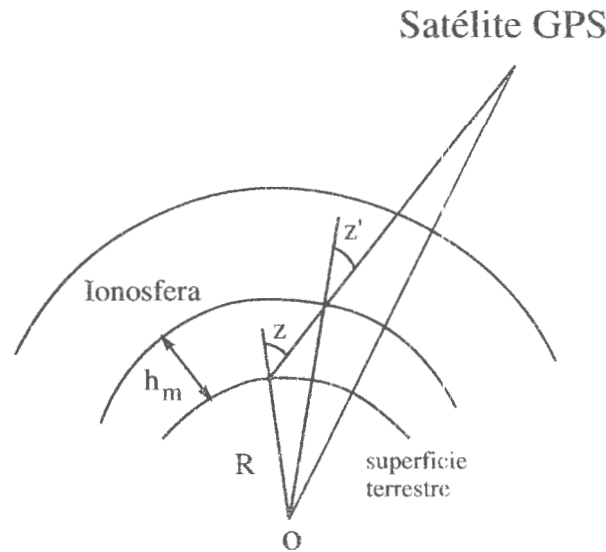


Figura 2.14: Disposición geométrica de la atmósfera para el modelo ionosférico

- Utilización del modelo de ionosfera y parámetros asociados radiodifundidos en el mensaje del satélite para introducir la correspondiente corrección.
- Empleo de receptores capaces de observar sobre las dos frecuencias L1 y L2 para eliminación del retardo ionosférico (ionosfera libre).

En el primer caso, el efecto puede quedar reducido a un 50 % de su verdadero valor, lo que resulta muy significativo para líneas geodesicas de longitud no superior a 100 Km., pero insuficiente para mayores líneas geodesicas. Vamos analizar mejor la segunda forma.

Para esta segunda forma consideremos el modelo de las pseudodistancias, aplicada a cada una de las dos frecuencias y con el efecto ionosférico

$$\begin{aligned} R_{L1}(t) &= \rho_i^k(t) + c[dt^k(t) - dt_i(t)] + (I_i^k)_{L1}, \\ R_{L2}(t) &= \rho_i^k(t) + c[dt^k(t) - dt_i(t)] + (I_i^k)_{L2}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Una combinación lineal de ambas es

$$R_{L1,L2}(t) = m_1 R_{L1}(t) + m_2 R_{L2}(t), \quad (2.27)$$

y como con ella queremos eliminar el retardo ionosférico, pues sustituyendo las expresiones de las pseudodistancias e igualando a cero  $m_1(I_i^k)_{L1} + m_2(I_i^k)_{L2} = 0$ .

En la ecuación anterior nos encontramos con dos incógnitas, y entonces asignando un valor



arbitrario a una de ellas,  $m_1 = 1$ , tendremos

$$m_2 = -\frac{(I_i^k)_{L1}}{(I_i^k)_{L2}} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2}.$$

Y por tanto, queda eliminado el retardo ionosférico

$$R_{L1,L2}(t) = R_{L1}(t) + \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2} R_{L2}(t) = (1 - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2})(\rho_i^k(t) + c[dt^k(t) - dt_i(t)]). \quad (2.28)$$

De un modo similar se obtiene una combinación lineal para las fases de la portadora que elimine el retardo ionosférico utilizando las dos frecuencias emitidas

$$\Phi_{L1,L2} = \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \Phi_{L2}. \quad (2.29)$$

### Efecto troposférico

La troposfera es la capa más cercana a la superficie de la Tierra. En esta zona la temperatura decrece a medida que la altitud aumenta, siendo su característica principal la ausencia de iones libres, haciendo que la propagación sea independiente de la frecuencia, es decir, no se produce el fenómeno descrito en la ionosfera de adelanto en la portadora y retraso en la información que contiene.

La corrección troposférica, intrínsecamente, depende de las condiciones meteorológicas existentes en la estación en el instante de la observación. Para ello se suele considerar que la capa está dividida en dos partes, una de ellas seca, y otra húmeda. Se atribuye a la seca un 90% del total del retraso sufrido por las ondas, mientras que a la húmeda se le da el 10% restante

$$\Delta T = T_i^k = \Delta T_{sec} + \Delta T_{hum}, \quad (2.30)$$

y aplicando la ley de Snell para la troposfera,  $\Delta T = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N ds$  tendremos que

$$\Delta T = \Delta T_{sec} + \Delta T_{hum} = 10^{-6} \left( \int N_{sec} ds + \int N_{hum} ds \right), \quad (2.31)$$

En las ecuaciones anteriores hemos sustituido  $n - 1 = 10^{-6} N$  ya que el índice de refracción troposférico es muy pequeño. La determinación de esos valores de  $N$  se hace a través de modelos como, por ejemplo, **el modelo de Hopfield**, que es el que describiremos a continuación.

La refractividad de la parte seca de la capa admite la siguiente expresión, determinada empíricamente, en función de la altura sobre la superficie terrestre

$$N_{sec}(h) = N_{sec,0} \left(1 - \frac{h}{h_s}\right)^4, \quad (2.32)$$

donde  $h_s = 40136 + 148,72(T - 273,16)$  metros, y  $N_{sec,0} = c_1 \frac{p}{T}$ , siendo  $T$  la temperatura en grados Kelvin,  $p$  la presión atmosférica en milibares y  $c_1$  un coeficiente determinado empíricamente,  $c_1 = 77,64 \frac{^{\circ}K}{mb}$ .



Para la parte húmeda Hopfield indica una expresión análoga a la refractividad de la parte seca

$$N_{hum}(h) = N_{hum,0} \left(1 - \frac{h}{h_h}\right)^4, \quad (2.33)$$

donde se usa el valor medio de la altura de la capa atmosférica,  $h_h = 11000m$  y  $N_{hum,0} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2}$ , con  $c_2 = -12,96 \frac{^{\circ}K}{mb}$  y,  $c_3 = 3,718 \cdot 10^5 \frac{^{\circ}K^2}{mb}$ , en lo que  $e$  representa la presión relativa del vapor de agua en milibares.

Introduciendo ambas expresiones en la ecuación (2.31) y teniendo en cuenta el ángulo de elevación  $E$  del satélite en el instante de observación obtenemos la siguiente expresión

$$\Delta T(E) = \frac{10^{-6}}{5} \left[ \frac{N_{sec,0} h_s}{\sqrt{\sin(E^2 + 6,25)}} + \frac{N_{hum,0} h_h}{\sqrt{\sin(E^2 + 2,25)}} \right]. \quad (2.34)$$

Por tanto, es necesario medir las condiciones meteorológicas,  $p$ ,  $e$  y  $T$  en el lugar de la observación para determinar los retrasos, en función de la posición del satélite. A pesar de las dificultades de poder modelizar el efecto troposférico, las mejores soluciones se obtienen combinando datos meteorológicos medidos tanto en la superficie terrestre como a diferentes alturas con radiosondas y datos radiométricos del vapor de agua.

### 2.4.3. Efemérides de los satélites

Puesto que el problema del posicionamiento absoluto consiste en la resolución del modelo vectorial formado por el receptor, el centro de la Tierra y el satélite GPS, será necesario conocer a priori el vector geocéntrico del satélite. Dicho vector queda establecido por las coordenadas cartesianas del satélite, y se determinará a partir de sus elementos orbitales y sus variaciones temporales, denominado efemérides del satélite.

Existen dos maneras de obtener dichas efemérides en un instante dado: efemérides transmitidas y efemérides precisas. La diferencial principal entre ellos es la precisión con la que se obtiene la posición del satélite, estando ordenados de menor a mayor: precisión.

Las efemérides emitidas están basadas en observaciones de pseudodistancia de los satélites GPS realizadas por las estaciones del segmento de control. Dichas efemérides forman parte del mensaje de navegación, contienen información general, información orbital e información del reloj del satélite. La indeterminación en la posición es de unos 20 a 50 metros. Son predichas para un período entre 12 y 36 horas y están referidas al elipsoide de referencia WGS-84.

Las efemérides precisas son las que se usan en trabajos geodésicos. Son obtenidas a partir de los datos registrados por estaciones permanentes repartidas por todo el mundo. Obteniendo a partir de ellas ficheros que contienen en intervalos de 15 minutos la situación de los satélites y el error de su oscilador. Existen numerosos organismos que se encargan de la obtención de dichas efemérides: el *International GPS Geodynamic Service (IGS)*, el *Center for Orbit Determination in Europe (CODE)*, el *National Geodetic Survey (NGS)*, etc.

El error cometido en la posición de los satélites con estas efemérides es de 5 a 10 cm. El único inconveniente de dichas efemérides es que no se pueden obtener en tiempo real, ya que no están disponibles hasta dos semanas después de las observaciones realizadas.

La propagación del error entre la posición del satélite y el posicionamiento del receptor es  $\frac{db}{b} = \frac{dr}{r}$ , donde  $b$  es la distancia entre las estaciones,  $r$  es la distancia media satélite-receptor y  $db$  es el error propagado por la incertidumbre  $dr$  en las coordenadas del satélite.

Los ficheros de efemérides están disponibles como ficheros diarios, en formato SP3 y cuya denominación es la siguiente

$$CCCxxxxn.sp3,$$

donde: CCC es el código del organismo que calcula las efemérides (en nuestro caso sería IGS); xxxx, la semana GPS de la que se quieren los datos;  $n$  es un número que varía del 0 al 6 e indica, el día de la semana GPS que se desea visualizar, el 0 corresponde al Domingo, el 1 al Lunes y así sucesivamente.

#### 2.4.4. Errores de los osciladores de satélites y receptores.

Las medidas GPS están íntimamente ligadas al sistema de tiempo definido por los satélites y por el receptor. Los errores en los osciladores tanto de los satélites como de los receptores se propagarán a los resultados obtenidos en la resolución del modelo, como hemos visto en el capítulo anterior. Aunque los osciladores sean altamente estables, siempre existirá una degradación de los mismos que afectará a la sincronización de las escalas individuales de los satélites y los receptores con la escala de tiempo GPS.

Generalmente no será posible determinar el error temporal del oscilador del receptor, formando parte de las incógnitas del modelo, calculándose conjuntamente con las demás incógnitas. No ocurre así con el error del oscilador del satélite, pues la estación principal mediante un seguimiento permanente de cada satélite, calcula el error del oscilador respectivo. Este error es inyectado a los satélites junto a las efemérides por la estación principal de control y transmitido en el mensaje de navegación.

#### 2.4.5. Errores debidos a la relatividad

Dado que el sistema de referencia terrestre localizado en el centro de la Tierra se considera fijo mientras que cada satélite materializa un sistema de referencia acelerado ha de tenerse en cuenta la teoría de la relatividad, si bien los efectos producidos son muy pequeños. Los efectos relativistas influyen en la órbita de cada satélite, la propagación de la señal y en los osciladores de los satélites y de los receptores [24].

Las perturbaciones relativistas existentes en las órbitas de los satélites están producidos por el

campo gravitatorio terrestre. Los valores que se obtienen son del orden de los  $10^{-10} m/s^{-1}$ , por lo que pueden en principio despreciarse.

La propagación de la señal se ve afectada por la curvatura del espacio-tiempo, por lo que habrá que corregirla para poder obtener la distancia euclídea. La corrección en distancia debida a este efecto viene dada por

$$\Delta\rho = \frac{2\mu}{c^2} \ln \frac{\rho^j + \rho_i + \rho_i^j}{\rho^j + \rho_i - \rho_i^j}, \quad (2.35)$$

donde  $\rho^j$  y  $\rho_i$  son las distancias geocéntricas del satélite  $j$  y del receptor  $i$ ,  $\rho_i^j$  es la distancia satélite-receptor y  $\mu$  es la constante de gravitación referida a la Tierra.

Con ello se llega a correcciones que nunca superan los  $10^{-5}$  metros, en posicionamiento absoluto, por lo que también suelen despreciarse.

Ya hemos visto que para la medida de tiempos se define el sistema GPS Time. Dicho sistema se ha construido de modo que coincide con el tiempo propio de los receptores en Tierra cuando su altitud sobre el geoide es cero. Pero a causa de la relatividad el tiempo del satélite es distinto al sistema de tiempo GPS. El valor de esta diferencia se determina a partir de la frecuencia fundamental que genera el oscilador del satélite. Sea  $f'_0$  la frecuencia desviada a causa del movimiento del satélite, entonces la variación en la frecuencia viene dada por

$$\Delta f = \frac{f'_0 - f_0}{f_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \frac{\Delta U}{c^2}, \quad (2.36)$$

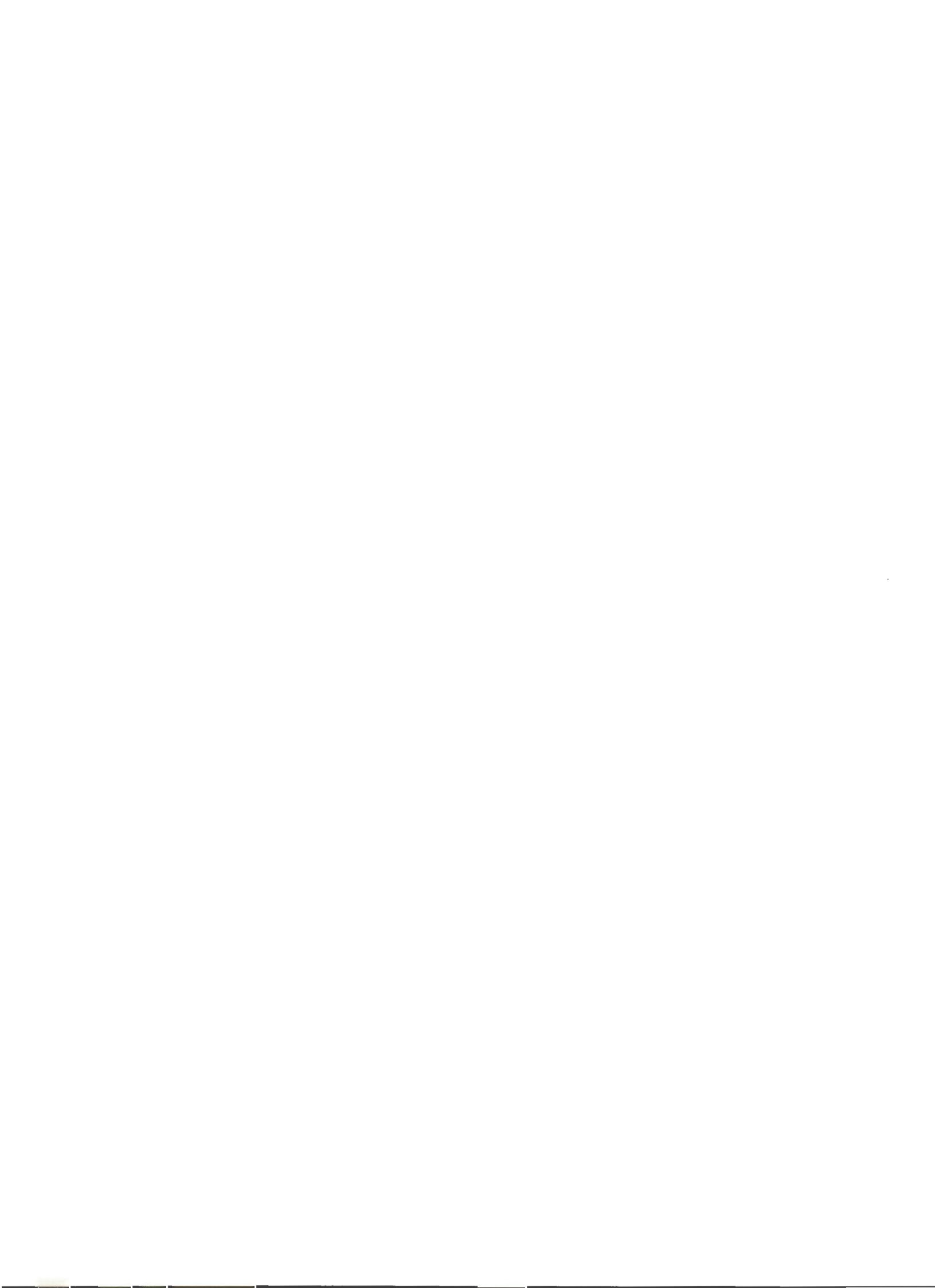
donde  $f_0$  es la frecuencia nominal,  $v$  y  $c$  las velocidades medias del satélite y de la luz en el vacío, respectivamente y  $\Delta U$  la diferencia de potencial gravitatorio terrestre en la superficie de la Tierra y en la posición orbital del satélite.

Haciendo la simplificación de considerar una Tierra esférica la ecuación anterior puede escribirse

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \frac{\mu}{c^2} \left[ \frac{1}{R+h} - \frac{1}{R} \right] = 4,464 \times 10^{-10}, \quad (2.37)$$

donde  $R$  es el radio de la Tierra y  $R+h$  el radio orbital.

Esto quiere decir que la frecuencia nominal del satélite se ve incrementada de forma permanente en  $4,464 \times 10^{-10}$ , lo que se evita simplemente disminuyendo la frecuencia nominal precisamente en esa cantidad, antes de poner en órbita el satélite.



## Capítulo 3

# Redes Geodésicas. Campañas de observaciones GPS

### 3.1. Introducción

Una red geodésica es un conjunto de puntos convenientemente materializados sobre el terreno entre los que se han efectuado observaciones geodésicas con la finalidad de obtener sus coordenadas respecto a un determinado sistema de referencia, así como su precisión y fiabilidad en términos absolutos y relativos.

Una vez proyectada, observada, calculada y compensada, una red geodésica constituye la materialización del sistema de referencia o marco de referencia y como tal, sirve de apoyo a las labores topográficas y cartográficas.

El instrumental y metodología clásicos, así como la propia configuración de las redes, difiere sustancialmente si se trata de obtener coordenadas planimétricas o altimétricas. Todo el conjunto influye en la precisión final con que se obtienen las coordenadas. Por ello las redes geodésicas se han agrupado tradicionalmente en redes horizontales o planimétricas y en redes verticales o altimétricas.

En 1956, Hotine, en un congreso organizado en Munich expuso un nuevo enfoque para la geodesia, en la que sustituía el tratamiento separado de la planimetría y al altimetría por un tratamiento combinado de ambos tipos de magnitud. Este tipo de geodesia tridimensional, ha cobrado en los últimos años una gran importancia debido a la facilidad con la que es posible, gracias al GPS, obtener incrementos de coordenadas cartesianas en un sistema de referencia global y las necesidades de integración con observaciones clásicas.

## 3.2. Redes Tridimensionales

Se define una red tridimensional como un conjunto de puntos definidos por una tripleta de coordenadas  $(\varphi, \lambda, h)$  ó  $(x, y, z)$ , dependiendo del sistema de referencia. El tratamiento separado de la planimetría y de la altimetría se sustituye por un tratamiento combinado de ambos tipos de magnitudes.

Las observaciones clásicas, referidas a sistemas astronómicos locales, deben trasladarse a un sistema global. Las altitudes ortométricas deben ser transformadas en altitudes elipsoidales, lo que exige el conocimiento de la ondulación del geoide. Las observaciones GPS producen directamente incrementos de coordenadas cartesianas geocéntricas.

Los parámetros a determinar en geodesia tridimensional para cada punto son las tres coordenadas geodésicas y las dos componentes de la desviación de la vertical.

### 3.2.1. Redes GPS

Las redes de estaciones GPS permanentes proporcionan un importante servicio en lo que se refiere a la disponibilidad de observables GPS de alta precisión y que permite a cualquier usuario un posicionamiento preciso.

Disponer de una red de estaciones GPS permanentes se ha convertido en un pilar básico para el desarrollo de aplicaciones GPS en un territorio. Una red ofrece la posibilidad de utilizar sus estaciones para un posicionamiento relativo, preciso, y además la infraestructura para la difusión de correcciones diferenciales en tiempo real.

Una red de estaciones GPS permanentes tiene una gran utilidad para la ingeniería civil. Facilita y economiza el establecimiento de redes de control en obras de gran envergadura. Del mismo modo, se pueden estudiar las cuencas hidrográficas señalando los lugares con peligro de inundación o desbordamiento, acumulaciones de vegetación, etc.

En la actualidad, son ya casi un centenar el número de estaciones instaladas por todo el territorio nacional, en algunos casos controladas por organismos geodésicos y en otras ocasiones por otro tipo de instituciones, e incluso empresas privadas. Dichas redes están orientadas a ámbitos muy distintos y se han establecido cubriendo superficies muy dispares. Existen redes GPS a nivel mundial (IGS), continental (EUREF), nacional (ERGPS) y regional.

## 3.3. La Red Geodésica del ROA

Desde el nacimiento del sistema GPS como técnica geodésica fue incorporada por el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) mediante la adquisición y puesta en funcionamiento

de equipos geodésicos de observación. Desde 1994 el ROA estableció una red geodésica para el estudio de las deformaciones producidas en la zona "Ibero-Magrebí" [15], y como apoyo a distintos trabajos de investigación (sismología, magnetismo, etc) [14]. Mediante observaciones de satélites GPS vamos a poder determinar modelos matemáticos que representen la deformación que experimenta dicha zona. La repetitividad de las observaciones permite controlar los movimientos y desplazamientos corticales de la zona.

### 3.3.1. Vértices Geodésicos

La red geodésica del ROA está conformada por un conjunto de vértices geodésicos enclavados en el Sur de España y Norte de África. Todos los vértices se encuentran monumentados sobre plataformas de cemento. A continuación se describen cada uno de los vértices, distribuidos como se indica en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Estaciones de la red geodésica del ROA.

Dentro de los vértices podemos distinguirlos en dos. Por un lado los vértices de la red permanente del ROA, obteniéndose datos de forma continua y los vértices utilizados en diferentes campañas. Los puntos de la red permanente serían:

**San Fernando (SFER):** Se encuentra incluida en la red EUREF, y desde 1996 incluida en la red del IGS (*International Geodynamic Service*). En la actualidad esta formada por un receptor TRIMBLE 4000SSI, cuyo oscilador está monitorizado por un patrón atómico de Cesio de la sección de Hora del ROA, y una antena Trimble Choke-Ring. Su número DOMES es 13402M004.

**Cartagena (CART):** Fue instalada en Diciembre de 1997 en la Estación Naval de la Algameca,



y actualmente consta de un receptor TRIMBLE 4000SSE y una antena Trimble Choke-Ring.

**Melilla (MELI):** Instalada en Mayo de 1998 y actualmente esta dotada de un receptor TRIMBLE 4000SSE y de una antena TRM22020.00+GP.

**Mahón (MAHO):** Situada en Menorca (I. Baleares) fue instalada en Octubre de 1998 en la Estación Naval de Mahón. Actualmente esta constituida por el receptor TRIMBLE 4000SSE y la antena Trimble Choke-Ring.

**Granada (GRAN):** Instalada en Marzo de 2001 en el Observatorio de la Cartuja del Instituto Andaluz de Geofísica. Actualmente esta en servicio con un receptor TRIMBLE 4700 y una antena Trimble Choke-Ring.

**Alborán (ALBO):** Instalada en la Isla de Alborán en Enero de 2003. Cuenta como instrumentación con un receptor TRIMBLE 4000SSE y una antena TRM22020.00+GP.

**Ceuta (CEUD):** Instalada en Septiembre de 2003 en el Museo del castillo del Desnarigado. Está en servicio con un receptor Trimble NetRS y una antena TRM22020.00+GP.

Unas coordenadas geográficas de las estaciones de la red permanente del ROA referidas al elipsoide WGS-84, vienen reflejadas en la tabla 3.1.

Estación	ID	Coordenadas a Priori		
		X(m)	Y(m)	Z(m)
Alboran	ALBO	5162721.7392	-273657.7774	3722826.7349
Cartagena	CART	5059821.9663	-89383.3620	3869254.8300
Ceuta	CEUD	5150601.8209	-478834.4312	3718884.7759
Granada	GRAN	5077906.3122	-319058.4938	3834733.3587
Mahón	MAHO	4886508.5839	364717.2457	4069311.4851
Melilla	MELI	5205105.6255	-267253.7158	3664201.4875
San Fernando	SFER	5105519.0269	-555145.9118	3769803.2946

Tabla 3.1: Coordenadas a priori de las estaciones de la red permanente del ROA.

Y los otros emplazamientos utilizados por el ROA, de los cuales en su mayor parte son vértices de la red geodésica nacional y mantenidos por el IGN (*Instituto Geográfico Nacional*) y que se han observado en diferentes campañas son:

**Torre-Moya (MOYA):** Vértice geodésico de tercer orden de la Red Nacional y situado en lo alto de la antigua torre de vigilancia costera llamada Torre-Moya (Málaga). Su número es el 105403.



**Guardas-Viejas (GUVI):** Vértice geodésico también de tercer orden de la Red Nacional y situado a la entrada del pueblo de Guardas-Viejas, en la provincia de Almería.

**Monte Hacho (HACH):** Vértice geodésico situado en el acuartelamiento del Ejército de Tierra en Ceuta.

**Córdoba (CORD):** Vértice geodésico del Instituto Geográfico Nacional, llamado Morena y que se encuentra situado en la parte más alta de la Loma de la Morena. Su número de vértice es 92360.

**Segura de León (CAST):** Vértice geodésico también perteneciente al Instituto Geográfico Nacional y construido en el año 1974. Se encuentra situado sobre el techo que protege la escalera de acceso al torreón más alto del castillo de la población de Segura de León (Badajoz). Su número de vértice es 08962004.

**Tarifa (TARI):** Vértice Geodésico VN-9 de la Red Nacional Española. Se encuentra situado en lo alto de un cerro, en una divisoria de la Sierra de la Plata. Su número de vértice es 107716.

Unas coordenadas geográficas de las enclaves anteriores, vienen reflejadas en la tabla 3.2.

Estación	ID	Coordenadas a Priori		
		X(m)	Y(m)	Z(m)
Córdoba	CORD	5027021.2928	-408079.4835	3891771.7474
Guardas-Viejas	GUVI	5113592.3868	-253743.8455	3790966.8923
Monte Hacho	HACH	5150995.9829	-477172.8130	3718849.1138
Segura de Leon	CAST	4992028.4090	-571606.9921	3916652.6886
Tarifa	TARI	5133509.9013	-521551.3423	3736905.2781
Torre-Moya	MOYA	5105307.7992	-373731.1923	3792230.2646

Tabla 3.2: Coordenadas a priori de las estaciones de la red.

### 3.4. Observaciones GPS

Se han llevado a cabo diferentes campañas, asociadas a proyectos tanto nacionales como internacionales, en donde se han observado total o parcialmente la red geodésica del ROA. Analicemos cada una de las campañas, viendo que estaciones fueron observadas y que instrumentación se utilizó para la misma.

### 3.4.1. Febrero de 1998

La siguiente campaña realizada se desarrolló entre los días 23 y 27 de Febrero de 1998. La denominaremos ROA-FEB1998. Dicha campaña fue llevada a cabo por la sección de Geofísica del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA). Los puntos que se incluían en dicha campaña eran

- Cuatro puntos en la zona Ibero-Magrebí, el situado en Granada (GRAN), que posteriormente se ha convertido en estación permanente de la red del ROA, en Torre-Moya (MOYA), Guardas-Viejas (GUVI) y Córdoba (CORD).
- La estación de San Fernando (SFER) incluida en la red permanente del ROA.

Con el fin de alinear las soluciones al ITRF correspondiente, el ITRF94, fueron incluidas en el procesado las estaciones de Maspalomas (MAS1), Matera (MATE), Grasse (GRAS) y Wettzell (WTRZ) incluidas en IGS (*International Geodynamics Service*) y alejadas de la zona de estudio. Las coordenadas fueron transformadas a la época de la campaña, 1998.15, mediante el modelo dado en las ecuaciones (1.1) y (1.2), en donde las coordenadas y velocidades en el ITRF94 vienen reflejadas en la tabla 3.3

Estación	ID	X(m)	Y(m)	Z(m)
		$V_x$ (m/y)	$V_y$ (m/y)	$V_z$ (m/y)
Grasse	GRAS	4581691.075	556114.611	4389360.652
		-0.0125	0.0190	0.0087
Maspalomas	MAS1	5439192.263	-1522055.702	2953454.647
		0.0001	0.0154	0.0152
Matera	MATE	4641949.7981	1393045.205	4133287.278
		-0.0191	0.0202	0.0121
Wettzell	WTRZ	4075580.763	931853.599	4801568.010
		-0.0169	0.0173	0.0056

Tabla 3.3: Coordenadas y velocidades del ITRF94 para las estaciones del IGS

Los puntos observados en el análisis de esta campaña se observan en la figura 3.2

Los pares receptor/antena utilizados en la misma se reflejan en las tablas 3.4 y 3.5. La altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*). La información de cada par receptor/antena ha sido obtenida de los ficheros log de cada una de las estaciones (<ftp://igs.ifag.de/IGS/station>).

La antena TRM22020.00+GP es una Trimble Compact Geodetic L1/L2 con plano de Tierra, la antena TRM33429.00+GP es una Trimble Micro Centered Geodetic con plano de tierra, la



Figura 3.2: Estaciones procesadas en la campaña ROA-FEB1998.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Cordoba (CORD)	TRIMBLE 4000SSE	TRM33429.00+GP	0.049
Granada (GRAN)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.111
Guardas-Viejas (GUVI)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.004
Torre-Moya (MOYA)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.044
San Fernando (SFER)	TRIMBLE 4000SSE	TRM29659.00	1.626

Tabla 3.4: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña ROA-FEB1998.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Grasse (GRAS)	ROGUE SNR-12 RM	AOAD/ M_T	0.0350
Maspalomas (MAS1)	ROGUE SNR-12 RM	AOAD/ M_T	0.0330
Matera (MATE)	ROGUE SNR-8100	AOAD/ M_T NONE	0.1010
Wettzell (WTZR)	ROGUE SNR-8000	AOAD/ MT NONE	0.0710

Tabla 3.5: Equipos y antenas de las estaciones IGS de la campaña ROA-FEB1998.

AOAD/ M\_T NONE es una Allen Osborne Associates Dorne Margolin T Choke-Ring y por último la TRM29659.00 se trata de una Trimble Choke-Ring.

Las observaciones de los puntos de GRAN, MOYA, GUVI y CORD han sido en tomadas en sesiones de 24 horas, con una máscara de elevación de  $15^\circ$  y con un intervalo de 30 segundos. El resto de las observaciones fueron obtenidas en formato RINEX desde los centros de datos de EUREF ([igs.ifag.de/IGS/obs/1998](http://igs.ifag.de/IGS/obs/1998)) y del propio ROA.

### 3.4.2. Septiembre de 1998

La campaña ROA-SEP1998 fue llevada a cabo por la sección de Geofísica del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), durante cinco días consecutivos, desde el 14 al 18 de Septiembre de 1998. Se observaron los siguientes puntos:

- Un punto de la zona Ibero-Magrebí, el situado en el castillo de Segura de León (CAST).
- Tres puntos pertenecientes a la red permanente del ROA, Cartagena (CART), Melilla (MELI) y San Fernando (SFER).

Con el fin de alinear las soluciones al ITRF correspondiente, que en esta campaña es el ITRF96, fueron incluidas las observaciones GPS procedentes de estaciones permanentes IGS y situadas fuera de la zona de estudio, como son Herstmonceux (HERS), Maspalomas (MAS1), Matera (MATE) y Wettzell (WTRZ). Las coordenadas de dichas estaciones fueron transformadas a la época de la campaña a partir de sus velocidades y sus coordenadas en ITRF96 (Tabla 3.6)

Estación	ID	X(m)	Y(m)	Z(m)
		$V_x$ (m/y)	$V_y$ (m/y)	$V_z$ (m/y)
Herstmonceux	HERS	4033470.2358	23672.7612	4924301.2254
		-0.0102	0.0182	0.0128
Maspalomas	MAS1	5439192.2594	-1522055.6215	2953454.7079
		0.0002	0.0176	0.0153
Matera	MATE	4641949.7178	1393045.2816	4133287.3328
		-0.0189	0.0192	0.0136
Wettzell	WTRZ	4075580.6968	931853.6695	4801568.0442
		-0.0159	0.0174	0.0070

Tabla 3.6: Coordenadas y velocidades del ITRF96 para las estaciones del IGS.

Las estaciones procesadas para dichas campañas se reflejan en el siguiente mapa 3.3

El equipamiento utilizado en la estación de Castillo de Segura (CAST) al igual que el existente en el resto de las estaciones viene reflejado en las tablas 3.7 y 3.8. La información de cada par receptor/antena ha sido obtenida de los ficheros log de cada una de las estaciones (*igs.ifug.de/IGS/station*) y la altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*).

La antena TRM29659.00 corresponde a una Trimble Choke-Ring, la TRM22020.00+GP es una Trimble Compact Geodetic L1/L2 con plano de tierra, la AOAD/ M\_T es Allen Osborne Associates Dorne Margolin T Choke-Ring y por último la ASH700093 6E corresponde a una Ashtech Dorne Margolin T Choke-Ring.



Figura 3.3: Estaciones procesadas en la campaña ROA-SEP1998.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Cartagena (CART)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.00
Melilla (MELI)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.00
San Fernando (SFER)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	1.626
Segura de León (CAST)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.046

Tabla 3.7: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña ROA-SEP1998.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Herstmonceux (HERS)	ASHTECH Z-XII3	ASH70093 6E	0.0096
Maspalomas (MAS1)	ROGUE SNR-12 RM	AOAD/ M_T NONE	0.0330
Matera (MATE)	ROGUE SNR-8100	AOAD/ M_T NONE	0.1010
Wettzell (WTZR)	ROGUE SNR-8000	AOAD/ M_T NONE	0.0710

Tabla 3.8: Equipos y antenas de las estaciones IGS de la campaña ROA-SEP1998.

Las observaciones del punto de CAST han sido tomadas en sesiones de 24 horas, con una máscara de elevación de  $15^\circ$  y con un intervalo de 30 segundos. El resto de las observaciones fueron obtenidas en formato RINEX desde los centros de datos de EUREF ([igs.ifag.de/IGS/obs/1998](http://igs.ifag.de/IGS/obs/1998)) y del propio ROA.

### 3.4.3. Octubre de 1999

La campaña, llamada ROA-OCT99 la llevó a cabo la sección de Geofísica del ROA como colaboración en el proyecto TANGO99 de la Universidad de Oporto. Se desarrolló entre el 28 de Septiembre y el 1 de Octubre del año 1999. Los puntos que se incluían en dicha campaña son:

- Dos puntos de la zona "Ibero-Magrebí", situados en CEUTA (IIACII) y en Tarifa (TARI, Vértice geodésico VN-9).
- Cuatro puntos pertenecientes a la red permanente del ROA, Cartagena (CART), San Fernando (SFER), Mahón (MAHO) y Melilla (MELI).
- Una estación perteneciente al IGN (*Instituto de Geodesia Nacional*, Alicante (ALAC)).

Con el fin de de alinear las soluciones al ITRF correspondiente, el ITRF97, fueron incluidas las medidas GPS procedentes de estaciones permanentes incluidas IGS como son Herstmonceux (HERS), Maspalomas (MAS1), Matera (MATE), y Wettzell (WTRZ). Las coordenadas y velocidades de dichas estaciones están dadas en la tabla 3.9

Estación	ID	X(m)	Y(m)	Z(m)
		$V_x$ (m/y)	$V_y$ (m/y)	$V_z$ (m/y)
Herstmonceux	HERS	4033470.2327	23672.7565	4924301.2186
		-0.0113	0.0170	0.0099
Maspalomas	MAS1	5439192.2651	-1522055.6287	2953454.7059
		-0.0021	0.0171	0.0128
Matera	MATE	4641949.7201	1393045.2787	4133287.3311
		-0.0179	0.0192	0.0129
Wettzell	WTRZ	4075580.6968	931853.6663	4801568.0423
		-0.0158	0.0171	0.0071

Tabla 3.9: Coordenadas y velocidades del ITRF97 para las estaciones del IGS.

Dichas estaciones se reflejan en el siguiente mapa 3.4

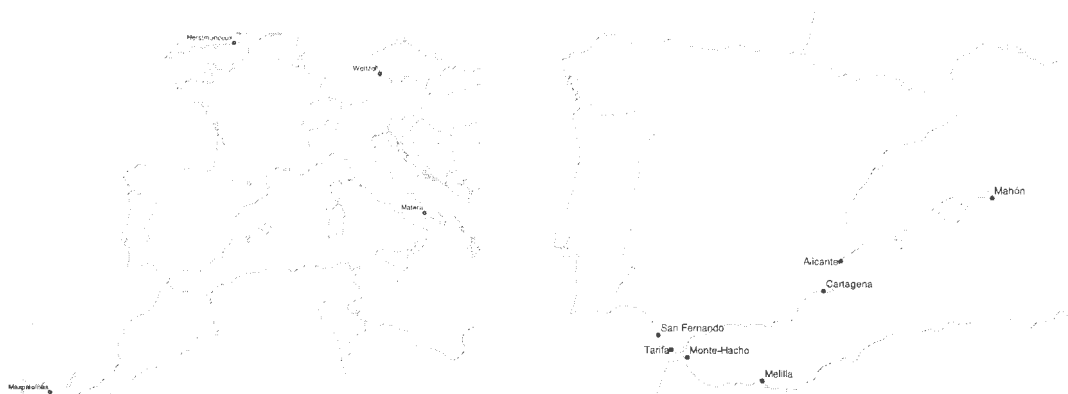


Figura 3.4: Estaciones procesadas en la campaña ROA-OCT1999.

Las observaciones GPS de las estaciones de HACH Y TARI han sido en sesiones 24 horas, con una máscara de elevación de 15° y con un intervalo de 30 segundos. El resto de las observaciones fueron obtenidas en formato RINEX desde los centros de datos de EUREF (<ftp://igs.ifaq.de/IGS/obs/1999>) y del propio ROA.

El equipamiento utilizado en las distintas estaciones viene reflejado en las tablas 3.10 y 3.11. La designación de la antena que se ha utilizado es la acorde con la nomenclatura IGS. La altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*).

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Alicante (ALAC)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	3.0350
Ceuta (HACH)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	1.3140
Cartagena (CART)	TRIMBLE 4000SSE	TRM29659.00	0.000
Mahón (MAHO)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
Melilla (MELI)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
San Fernando (SFER)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	1.6260
Tarifa (TARI)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.0550

Tabla 3.10: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña ROA-OCT1999.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Herstmonceux (HERS)	ASHTECH Z-XII3	ASH70093 6E	0.0096
Maspalomas (MAS1)	AOA SNR-12 ACT	AOAD/ M_T	0.0330
Matera (MATE)	TRIMBLE 4000SSI	AOAD/ M_T	0.1010
Wettzell (WTZR)	ASHTECH Z-XII3	AOAD/ M_T NONE	0.0710

Tabla 3.11: Equipos y antenas de las estaciones IGS de la campaña ROA-OCT1999.

#### 3.4.4. Septiembre de 2001

Debido a la imposibilidad de realizar una campaña en el campo a lo largo del año 2001, hemos producido una campaña virtual durante el mes de Septiembre, analizando 5 días de observaciones GPS de estaciones permanentes situadas en la zona "Ibero-Magrebí"; entre los días 9 y 13 de Septiembre de dicho año.

La campaña virtual, llamada ROA-SEP2001, incluía las siguientes estaciones:

- Cinco puntos pertenecientes a la red permanente del ROA: San Fernando (SFER), Granada (GRAN), Cartagena (CART), Melilla (MELI) y Mahón (MAHO).

- Cuatro estaciones pertenecientes al IGN: Málaga (MALA), Almería (ALME), Alicante (ALAC) y Ceuta(CEUT).

Con el fin de alinear las soluciones al ITRF correspondiente, en este caso el ITRF97, fueron incluidas las observaciones GPS procedentes de estaciones permanentes IGS alejadas de la zona de estudio, como son Grasse (GRAS), Maspalomas (MAS1), Matera (MATE) y Wettzell (WTZR). Las coordenadas de dichas estaciones fueron transformadas a la época de la campaña mediante el modelo dado en las ecuaciones (1.1) y (1.2), donde las coordenadas y las velocidades vienen dadas en la tabla 3.12

		<b>X(m)</b>	<b>Y(m)</b>	<b>Z(m)</b>
<b>Estación</b>	<b>ID</b>	$V_x(\text{m/y})$	$V_y(\text{m/y})$	$V_z(\text{m/y})$
<b>Grasse</b>	<b>GRAS</b>	4581691.0258 -0.0118	556114.6863 0.0185	4389360.6849 0.0090
<b>Maspalomas</b>	<b>MAS1</b>	5439192.2651 -0.0021	-1522055.6289 0.0171	2953454.7059 0.0128
<b>Matera</b>	<b>MATE</b>	4641949.7201 -0.0179	1393045.2787 0.0192	4133287.3311 0.0129
<b>Wettzell</b>	<b>WTRZ</b>	4075580.6968 -0.0158	931853.6663 0.0171	4801568.0423 0.0071

Tabla 3.12: Coordenadas y velocidades del ITRF97 para las estaciones del IGS.

Las estaciones procesadas en esta campaña vienen reflejadas en la figura 3.5.



Figura 3.5: Estaciones procesadas en la campaña ROA-SEP2001.

La información del par receptor/antena de cada una de las estaciones ha sido obtenida de los ficheros log de cada una de las estaciones (*igs.ifag.de/IGS/station*) y la altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*) (Tablas



3.13 y 3.14). La designación de la antena que se ha utilizado es la acorde con la nomenclatura IGS.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
<b>Grasse (GRAS)</b>	ROGUE SNR-12 RM	AOAD/ M_T	0.0350
<b>Maspalomas (MAS1)</b>	ASHTECH Z-XII3	AOAD/ M_T	0.0330
<b>Matera (MATE)</b>	TRIMBLE 4000SSI	AOAD/ M_T	0.1010
<b>Wetzell (WTZR)</b>	AOA SNR-8000 ACT	ASH70093 6E	0.0096

Tabla 3.13: Equipos y antenas de las estaciones IGS incluidas en ROA-SEP2001.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
<b>Alicante (ALAC)</b>	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	3.035
<b>Almería (ALME)</b>	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	3.044
<b>Cartagena (CART)</b>	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.000
<b>Ceuta (CEUT)</b>	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	0.000
<b>Granada (GRAN)</b>	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	0.000
<b>Mahón (MAHO)</b>	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
<b>Málaga (MALA)</b>	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	3.054
<b>Melilla (MELI)</b>	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
<b>San Fernando (SFER)</b>	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	1.626

Tabla 3.14: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña ROA-SEP2001.

Las observaciones, en formato RINEX, fueron obtenidas desde los centros de datos de EUREF ([igs.ifag.de/IGS/obs/2001](http://igs.ifag.de/IGS/obs/2001)), del servidor del IGN, para la estación de Málaga y del propio ROA.

### 3.4.5. Campañas episódicas 2003

En los últimos años se han instalado numerosas estaciones permanentes cerca de alguno de los puntos observados en campañas anteriores, y por ello se llevaron a cabo durante los meses de Abril y Mayo de 2003 algunas campañas episódicas, con el fin de obtener la distancia entre las estaciones permanentes, instaladas recientemente, y los puntos utilizados en otras campañas.

En total se han llevado a cabo tres campañas episódicas, en Almería, Málaga y Ceuta. Estudiemos cada una de ellas por separado.

### Episódica Ceuta

El día 9 de Abril se llevaron a cabo observaciones de satélites GPS en los puntos situados en Monte Hacho (Ceuta), para su posterior enlace con la estación permanente de Ceuta.

La observación se realizó durante dos horas (14:16 a 16:16) tomando una máscara de elevación de  $10^\circ$  y con un intervalo de 30 segundos. Posteriormente se obtuvo el fichero RINEX de la observación correspondiente de la estación de Ceuta, desde el servidor del IGN (*Instituto Geográfico Nacional*)

El equipamiento utilizado en ambas estaciones viene reflejado en la tabla 3.15, al igual que el equipamiento de Ceuta. La altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*). La información del par receptor/antena de la estación de Ceuta se ha obtenido a partir de su fichero log.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Monte-Hacho (HACH)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00 + GP	0.1509
Ceuta (CEUT)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	0.000

Tabla 3.15: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña episódica CEUTA2003.

La antena TRM22020.00 + GP corresponde a una antena Trimble Compact L1/L2 con Plano de Tierra, y la TRM29659.00 es una antena Trimble Choke-Ring.

### Episódica Almería

El 28 de Mayo se observó, para su posterior enlace con la estación permanente de Almería (ALME), el punto situado en Guardas-Viejas (GUVI). La observación se realizó durante dos horas (16:17 a 18:17) tomando una máscara de elevación de  $10^\circ$  y con un intervalo de 30 segundos. Posteriormente se obtuvo el fichero RINEX de la observación de la estación de Almería (ALME).

El equipamiento utilizado en la estación de Guardas-Viejas viene reflejado en la tabla 3.16, al igual que el equipamiento de Almería. La altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*). La información del par receptor/antena de la estación de Almería se ha obtenido a partir de su fichero log.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Guardas-Viejas (GUVI)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.120
Almería (ALME)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	3.044

Tabla 3.16: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña episódica ALMERIA2003.

### Episodica Málaga

Durante dos horas del día 29 de Mayo de 2003 se observó el vértice de Torre-Moya (MOYA) con una máscara de elevación de  $10^\circ$  y con un intervalo de 30 segundos (14:06 a 16:09) para su posterior enlace con la estación permanente de Málaga (MALA). Los datos procedentes de dicha estación han sido obtenidos a través del servidor de IGN.

El equipamiento utilizado en la estación de Torre-Moya viene reflejado en la tabla 3.17, al igual que el par receptor/antena de Málaga, cuya información también se ha obtenido de su fichero log. La altura de las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*).

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Torre-Moya (MOYA)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.120
Málaga (MALA)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	3.051

Tabla 3.17: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña episódica MALAGA2003.

#### 3.4.6. Diciembre de 2003

La campaña ROA-DIC2003 fue llevada a cabo por la sección de Geofísica del ROA. Se desarrolló durante cinco días consecutivos, desde el 9 al 13 de Diciembre de 2003. Los puntos que se incluían en dicha campaña son

- Dos puntos de la zona de estudio, Segura de Leon (CAST) y Córdoba (CORD).
- Seis puntos pertenecientes a la red permanente del ROA, Alborán (ALBO), Cartagena (CART), Granada (GRAN), Melilla (MELI), Mahón(MAHO) y San Fernando (SFER).
- Cuatro estaciones pertenecientes al IGN, Alicante (ALAC), Almeria (ALME), Ceuta (CEUT) y Málaga (MALA).

Con el fin de alinear las soluciones al ITRF correspondiente, en este caso el ITRF2000, fueron incluidas las medidas GPS procedentes de estaciones permanentes, situadas fuera de la zona de estudio e incluidas en IGS, de Herstmonceux (HERS), Maspalomas (MAS1), Matera (MATE) y Wettzell (WTZR). Las coordenadas y las velocidades de dichas estaciones fueron transformadas a la época de la campaña mediante el modelo 1.2, y las coordenadas y velocidades en dicho ITRF2000 vienen dadas en la tabla 3.18

En el mapa 3.6 se muestran las estaciones procesadas para esta campaña.

El equipamiento utilizado en las distintas estaciones viene reflejado en las tablas 3.19 y 3.20. La designación de la antena que se ha utilizado es la acorde con la nomenclatura IGS. La altura de

Estación	ID	X(m)	Y(m)	Z(m)
		$V_x$ (m/y)	$V_y$ (m/y)	$V_z$ (m/y)
Herstmonceaux	HERS	4033470.1785	23672.8240	4924301.2616
		-0.0128	0.0180	0.0095
Maspalomas	MAS1	5439192.2461	-1522055.5796	2953454.7683
		-0.0017	0.0175	0.0158
Matera	MATE	4641949.6525	1393045.3309	4133287.3840
		-0.0176	0.0203	0.0141
Wettzell	WTRZ	4075580.6386	931853.7116	4801568.0818
		-0.0151	0.0174	0.0097

Tabla 3.18: Coordenadas y velocidades del ITRF2000 para las estaciones del IGS.



Figura 3.6: Estaciones procesadas en la campaña ROA-DIC2003.

las antenas ha sido reducida al punto de referencia de cada una de ellas (ARP, *Antenna Reference Point*). La información de cada par receptor/antena de las estaciones del IGN y del IGS ha sido obtenida de los ficheros log de cada una de las estaciones ([//igs.ifag.de/IGS/station](http://igs.ifag.de/IGS/station))

Las observaciones de los puntos de CAST y CORD han sido en sesiones de 24 horas, con una máscara de elevación de  $10^\circ$  y con un intervalo de 30 segundos. El resto de las observaciones fueron obtenidas en formato RINEX desde los centros de datos de EUREF ([igs.ifag.de/IGS/obs/2003](http://igs.ifag.de/IGS/obs/2003)) y del propio ROA.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Alicante (ALAC)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	3.035
Alborán (ALBO)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
Almería (ALME)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	3.044
Cartagena (CART)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.000
Ceuta (CEUT)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	0.000
Córdoba (CORD)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+ GP	0.093
Granada (GRAN)	TRIMBLE 4700	TRM29659.00	0.000
Mahón (MAHO)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
Málaga (MALA)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00 DOME	3.051
Melilla (MELI)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.000
Segura de Leon (CAST)	TRIMBLE 4000SSE	TRM22020.00+GP	0.101
San Fernando (SFER)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	1.626

Tabla 3.19: Equipos y antenas de las estaciones de la campaña ROA-DIC2003.

Estación	Receptor	Antena	Altura(ARP)
Herstmonceux (HERS)	ASHTECH Z-XII3	ASH70093 6E	0.0096
Maspalomas (MAS1)	ASHTECH Z-XII3	AOAD/ M_T NONE	0.033
Matera (MATE)	TRIMBLE 4000SSI	TRM29659.00	0.101
Wetzell (WTZR)	AOA SNR-8000 ACT	AOAD/ M_T NONE	0.071

Tabla 3.20: Equipos y antenas de las estaciones IGS incluidas en ROA-DIC2003.



## Capítulo 4

# Software Bernese GPS: Procesado de los datos

Terminada toda la fase de medida de las observaciones GPS se procede a su estudio, procesando dichas medidas para determinar los resultados que buscamos. Sabiendo que las observaciones GPS se caracterizan por acumular una gran cantidad de observaciones que de algún modo puedan estar afectadas por varias fuentes de error (propagación de la señal, errores inherentes a los receptores, etc) la utilización de algún software comercial no garantiza la exactitud que se espera alcanzar.

Por ello es imprescindible la utilización de un software científico especializado, que permita la aplicación de modelos correctivos y algoritmos que tiendan a minimizar tales errores. Se ha utilizado para dicho procesamiento el software *Bernese GPS versión 4.2*, desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (Suiza), y que utiliza el cálculo de las dobles diferencias como principal técnica para la obtención de las soluciones.

Dicho software es conocido a nivel internacional por su alto grado de confiabilidad en el procesamiento y ajuste de los datos GPS arrojando resultados de alta exactitud y precisiones milimétricas. En este capítulo describiremos las principales partes del software, así como las diferentes estrategias que seguiremos en el procesado de los datos.

### 4.1. Estructura del programa

Se trata de un programa modulado, que se ha ido modernizando contando actualmente con la versión 4.2, y que contiene más de 100 subprogramas o subrutinas, escritos en lenguaje Fortran, y que dividen al programa en varias partes o secciones.

Las partes que componen el programa son:

1. Transformación de los datos: En ella se generan los ficheros de observación en formato

Bernese a partir del formato RINEX.

2. Órbitas: En ella se generan las órbitas precisas en formato estándar, independientes de la organización que las haya creado, y a partir de las órbitas en formato SP3.
3. Pre-procesado de los datos: Se establece un pre-procesado de las observaciones GPS, obteniendo las diferentes baselíneas a procesar, chequeando las observaciones de fase y marcando las pérdidas de ciclo.
4. Procesado: Es la parte principal del programa, en ella estimaremos los parámetros basándonos en las observaciones y obtendremos las diferentes ecuaciones normales para cada una de las sesiones que computemos.
5. Parte de simulación: Genera observaciones GPS basadas en información estadística.
6. Servicios: Es utilizada esta parte para editar ficheros en formato binario, comparar coordenadas, dibujar y eliminar residuos, etc.

Cada una de ellas puede verse en el siguiente diagrama de flujo (Figura 4.1), que nos muestra las funciones del software

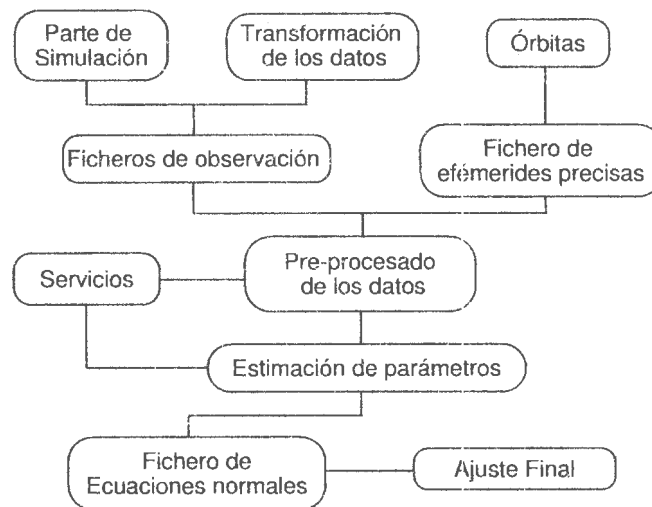


Figura 4.1: Diagrama de Flujo del software Bernese GPS.

Antes de empezar directamente a estudiar las características de cada una de las partes conviene realizar una serie de procesos anteriores y obtener cierta información a priori.



## 4.2. Preparación de los datos. Ficheros Externos

Para iniciar el procesado de las observaciones GPS es necesario obtener varios ficheros a priori sobre información de las estaciones, de los satélites, de los parámetros de rotación del Polo, ... y realizar algunas acciones previas. En una primera fase se deben ejecutar las siguientes acciones:

- Descomprimir y organizar los archivos de datos de las estaciones que procesemos, convirtiendo a formato RINEX los datos almacenados en diferentes receptores.
- Corrección de la altura de las antenas y modificación del encabezamiento de los archivos RINEX en todas las estaciones.
- Chequear la calidad de los datos RINEX a través del programa Teqc, diseñado por UNAVCO. Los datos que sean marcados como malos no serán procesados.

Culminadas estas acciones se procede a la segunda fase, obtener la información a priori. Dicha información consiste en la elección de los ficheros de configuración necesarios para el procesamiento de los datos. Estos ficheros vienen reflejados en la tabla 4.1

Tipo Fichero	Obtenido en
Órbitas precisas IGS	ftp://igs.ifag.de/IGS/products/orbits
Parámetros de Rotación	ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE
Sistema de referencia	ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/STA
Centro de fase de antena	ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/GEN
Modelos de Ionosfera	ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE
Carga Oceánica	A través del Observatorio de Onsala (Suecia)

Tabla 4.1: Ficheros externos usados en el procesado.

La rotación de la Tierra no es uniforme, ya que el eje de rotación de la Tierra varía debido al movimiento atmosférico y al flujo interior de la Tierra. Debido a ello es necesario incluir en el procesado unos parámetros de Rotación del Polo, los cuales también nos permiten pasar de un sistema de referencia celeste a un sistema de referencia terrestre utilizando dos matrices de rotación  $R_2(-x_p) \cdot R_1(y_p)$ , donde  $x_p$  y  $y_p$  indican la posición relativa del polo instantáneo verdadero con respecto al polo terrestre convencional. En dicho fichero se incluye dichas coordenadas.

La carga oceánica es la deformación de la Tierra debido al peso de las marcas oceánicas. Se produce fundamentalmente por la fuerza de gravitación del Sol y la Luna. Dicho efecto puede ser bastante grande con lo que es necesario que sea cuantificado para mejorar la precisión de nuestra solución. Puede ser modelado por un sumatorio en donde aparecen los 11 periodos de las mareas

( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m$  y  $S_{sa}$ ), llamados armónicos. Nosotros hemos utilizado el modelo de GOT99.2, cuyos datos suministra el Observatorio de Onsala en Suecia.

Los modelos globales de la ionosfera, dados en formato Bernese, los hemos utilizado a la hora de resolver las ambigüedades mediante el algoritmo QIF, que veremos posteriormente, ya que para dicho algoritmo no es posible utilizar la combinación  $L_3$ , que nos eliminaba los efectos de la ionosfera.

### 4.3. Transformación de los datos

Antes de empezar a trabajar debemos de transformar los ficheros de observaciones dados en formato RINEX en formato Bernese. Se trata de un formato binario y característico del software. Ello lo realiza el subprograma *RXOBV3*, el cual crea los ficheros de observación de diferencias cero partiendo de los ficheros RINEX.

Por cada fichero RINEX se originan cuatro ficheros en formato Bernese:

- \*.PZH: Fichero cabecera de la diferencia cero de la fase, el cual contiene información sobre la estación, el receptor, la antena, ...
- \*.PZO: Fichero de observaciones de fase.
- \*.CZH: Fichero cabecera del código, el cual contiene información similar al fichero \*.PZH, salvo que éste no contiene la ambigüedad.
- \*.CZO: Fichero de observaciones de código.

### 4.4. Órbitas de los satélites

En este trabajo se han utilizado efemérides precisas, obtenidas a partir de los datos registrados por estaciones permanentes repartidas por todo el mundo. Con dichos datos se generan unos ficheros que contienen, en intervalos de 15 minutos la situación de los satélites. De entre los numerosos organismos que se encargan de la obtención y distribución de dichas efemérides, nosotros las hemos obtenido del IGS (*International Geodynamic Service*). Las efemérides se encuentran disponibles en ficheros diarios y en formato \*.SP3.

Dentro del software Bernese existen varios subprogramas que tratan el problema de las órbitas de los satélites (generar órbitas en varios formatos, unir órbitas, etc), aunque nosotros sólo trabajaremos con dos de ellos, los llamados *PRETAB* y *ORBGEN*

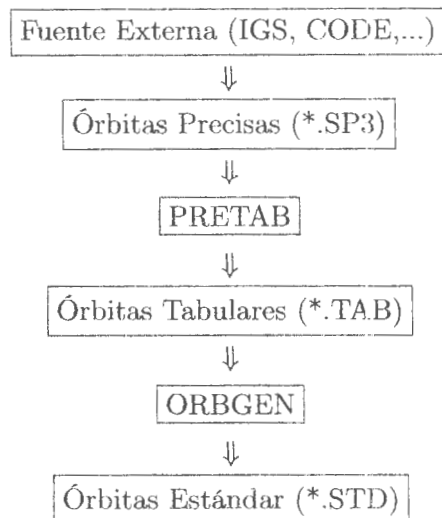


Tabla 4.2: Programas de la parte de órbitas del Bernese.

### Órbitas Tabulares

El primer paso es transformar el fichero de órbitas precisas en un fichero de órbitas tabulares, que se realizará a través del subprograma *PRETAB*. El fichero en formato tabular contiene los parámetros orbitales del satélite referenciados al sistema de referencia celeste J2000, a diferencia de las órbitas en formato \*.SP3 que se encuentran referidas a un sistema terrestre (ITRF).

Con dicho programa se genera también un fichero con el estado del oscilador del satélite, el cual puede ser computado para las correcciones del reloj de los satélites de cada una de las observaciones con respecto al tiempo GPS mediante una aproximación polinómica

$$dt_i(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$$

como ya hemos visto anteriormente.

### Órbitas estándar

El último paso es la creación de las órbitas en formato estándar, a partir de las órbitas tabulares. El subprograma utilizado es el *ORBGEN*, el cual crea dichas órbitas, compuestas de uno o más arcos estándar cada uno de ellos caracterizado por un instante inicial y final.

Cada arco estándar es solución de la ecuación de movimiento de dos cuerpos

$$\dot{\bar{r}} = -GM \frac{\bar{r}}{r^3} + \bar{a}(t, \bar{r}, \dot{\bar{r}}, p_0, p_1, \dots),$$

caracterizada por 6 condiciones iniciales y un número de parámetros determinados, nueve en concreto.

Las órbitas estándar se crean a partir de las órbitas tabulares realizando un ajuste por mínimos cuadrados. El modelo de órbita, llamado  $B$ , se caracteriza por los parámetros dados en la tabla 4.3

Parámetro	Modelo
Modelo Geopotencial	JGM3
Efemérides de los planetas	DE200
Modelo de océanos	OT_CSRC

Tabla 4.3: Modelo de órbitas para el software Bernese.

## 4.5. Pre-procesado de los datos

Dentro del pre-procesado podemos distinguir tres partes diferenciadas:

1. Mediante el análisis de las observaciones de código se realizará las correspondientes correcciones de los errores del reloj de los receptores. Todo ello con el subprograma *CODSPP*, el cual también nos sirve para estimar unas coordenadas iniciales utilizando las primeras diferencias de código.
2. Formación de las líneas bases independientes, llamadas simples diferencias, a partir de los ficheros de fase para cada una de las estaciones. Se realiza con el subprograma *SNGDIF*.
3. Identificación de los saltos de ciclo y su eliminación. De ello se encarga el subprograma *MAUPRP*, el cual procesa los ficheros de fase línea a línea usando triples diferencias.

Veamos cada una de ellas por separado.

### Code Simple Point Processing (CODSPP)

La subrutina *CODSPP* computa el error del oscilador del receptor con respecto al tiempo GPS,  $dt_i(t)$ , utilizando las medidas de código obtenidas anteriormente en el subprograma *RXOBV3*. Las medidas de código sólo se utilizarán en esta subrutina.

Dicho error  $dt_i(t)$  es determinado con una precisión de  $10^{-6}$  segundos, para que así el error en la distancia geométrica  $\rho_i^k(t)$  sea menor que un 1 mm. Con ello el error cuadrático medio (RMS) de las medidas de código será menor que

$$(c \cdot dt_i(t))_{max.} = c \cdot (10^{-6} \text{seg.}) \simeq 300 \text{mts.},$$

aunque dicho error nunca es alcanzado ya que con la degradación artificial (S/A) se alcanza un error de 20-30 metros y sin degradación de 1-3 metros.

El programa utiliza la combinación lineal de ionosfera libre,  $L_3$ , en el ajuste por mínimos cuadrados para determinar el error del oscilador del receptor y las coordenadas del mismo.

### Single Difference (SNGDIF)

Con el programa *SNGDIF* no se obtiene ningún resultado, sólo se crean las simples diferencias, tanto de código como de fase (aunque sólo utilizaremos las de fase) entre diferentes receptores. El subprograma permite distintas estrategias a la hora de formar las baselíneas (manual, estrella, predefinidas, etc). Nosotros en este trabajo hemos seleccionado la estrategia predefinida, eligiendo nosotros las estaciones de cada una de las baselíneas.

El software Bernese calcula las baselíneas en función del número de receptores para que sean un conjunto linealmente independiente. Con ello se determinaran las baselíneas que unen nuestros receptores y forman la red para el control geodinámico.

### Manual and Automatic Pre-procesing (MAUPRP)

Formadas las baselíneas se ha llevado a cabo un pre-procesado previo de las triples diferencias, de donde se corrige la pérdida de ciclo y se marcan los residuos. Para ello usamos el subprograma *MAUPRP*. Los datos marcados y que después no se utilizaran para el procesado han sido:

- Datos por debajo de la elevación sobre el horizonte de  $10^\circ$ .
- Observaciones desajustadas, es decir, cuando no es posible formar combinaciones lineales con  $L_1$  y  $L_2$ .
- Observaciones en pequeños periodos de tiempo (menor que 5 minutos).

Con dicho subprograma también identificamos los saltos de ciclo y errores groseros en los ficheros anteriores de simples diferencias. Un salto de ciclo se produce por la pérdida momentánea de señal procedente del satélite. Dicho subprograma intenta corregirlos y si no pueden ser fijados introduce una nueva ambigüedad para el posterior procesado.

El programa utiliza las triples diferencias para el análisis de los saltos de ciclos. Es importante ver que el error RMS de las soluciones de las triples diferencias no debe ser mayor que 1 cm.

## 4.6. Estimación de parámetros

Una vez terminado el pre-procesado de los datos, deberemos de obtener las llamadas ecuaciones normales de la observación con el fin de obtener posteriormente las coordenadas finales. El subprograma *GPSEST* permite la estimación de distintos parámetros (troposfera, estimación de ambigüedades, obtención de coordenadas, etc). Constituye la estructura donde deben realizarse modificaciones en el mejoramiento del modelo de las observaciones GPS.

La subrutina *GPSEST* utiliza como ecuación fundamental de observación las dobles diferencias y las distintas combinaciones de las portadoras. Para obtener las ecuaciones normales diarias, independientes entre sí, es necesario ejecutarlo tres veces. En la primera de ellas para la estimación de un modelo de troposfera inicial, la segunda para el cálculo de las ambigüedades y por último para la obtención de la solución final, las llamadas ecuaciones normales. Veamos cada una de ellas.

### Modelo de Troposfera

Como ya hemos visto anteriormente se produce un desfase en las señales GPS al atravesar las capas de la atmósfera más próximas a la Tierra. Anteriormente vimos que dicha corrección troposférica estaba definida por

$$\Delta T = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N_{sec} ds + 10^{-6} \int N_{hum} ds,$$

donde  $N$  representa la refractividad.

Para corregir dicho retardo estimaremos el retraso en la distancia cenital con las medidas de satélites GPS. La corrección troposférica se puede representar como el producto entre el error en la distancia cenital y la "mapping function",  $f(z)$

$$\Delta T = \Delta T^0 f(z).$$

y con el software grabaremos dicho retrasos en un fichero que nos servirá para estimar la corrección troposférica y en donde se recogen los parámetros troposféricos por estación y día procesado. En nuestro trabajo hemos utilizado la función Dry-Neill y la combinación  $L_3$  de las portadoras. También durante esta ejecución se han determinados los posibles residuos de las baselines y se han eliminado utilizando el subprograma *RESRMS*.

### Cálculo de ambigüedades

En este paso se fijan los parámetros troposféricos calculados anteriormente, y se introducen el modelo de ionosfera y el modelo de carga oceánica, efectuando en este paso el cálculo de las ambigüedades.

Para resolver ambigüedades el software Bernese asigna un número entero al valor real estimado. Para ello se pueden utilizar varias estrategias. En este trabajo hemos considerado el algoritmo QIF (*Quasi-Ionosphere Free*). Dicha estrategia requiere ambas portadoras  $L_1$  y  $L_2$  y un modelo ionosférico a priori que ha sido introducido.

### Ecuaciones normales

Finalmente ejecutamos nuevamente el *GPSEST* introduciendo las ambigüedades calculadas y fijadas anteriormente. El principal objetivo de este paso es la obtención de las ecuaciones normales para cada una de las sesiones procesadas.

En este paso se ha utilizado la combinación de ionosfera libre,  $L_3$  y la correlación existente entre todos las baselines linealmente independientes y simultáneas que intervienen en el procesado.

## 4.7. Ajuste final

Para el ajuste final de todas las ecuaciones normales (NEQ) se ha utilizado el subprograma *ADDNEQ*. En un primer paso se ha obtenido una solución sin constreñimientos, consistente en la combinación de todas las ecuaciones normales y fijando a priori una única estación. Dicha solución se le llama solución libre. En ella se pueden preeliminar posibles residuos de la solución y que podrían afectar a las coordenadas finales.

En un segundo paso se han obtenido las coordenadas definitivas, combinando también todas las ecuaciones normales pero constreñidas, es decir, fijando las coordenadas de las estaciones IGS en el ITRFyy y época correspondiente a cada campaña.





## Capítulo 5

# Resultados de las campañas observadas

Ahora analizaremos los resultados obtenidos con el software Bernese durante el procesado de cada una de las campañas analizadas anteriormente, y obtendremos las coordenadas finales de cada una de ellas en la última realización del ITRF, el ITRF2000, para posteriormente poder obtener las diferentes velocidades horizontales de movimiento de los puntos observados. Los datos de cada campaña han sido procesados siguiendo el procedimiento recomendado por EUREF en el 3<sup>rd</sup> Workshop de los Centros de Análisis celebrado en Polonia en 2001.

### 5.1. Campaña Febrero de 1998

Se han conectado las estaciones IGS con las situadas en la zona de estudio. Las baselíneas formadas tienen una longitud comprendida entre 1878400.929 y 74474.458 metros como se observa en la tabla 5.1.

Baselínea	Longitud	PPM	RMS
<b>CORD-MOYA</b>	131213.831	0.0052	0.0002
<b>CORD-WTZR</b>	1878400.929	0.0013	0.0003
<b>GRAN-GRAS</b>	1148812.203	0.0018	0.0003
<b>GRAN-GUVI</b>	86342.377	0.0116	0.0002
<b>GUVI-MATE</b>	1746867.091	0.0009	0.0002
<b>MAS1-SFER</b>	1308692.879	0.0120	0.0013
<b>MOYA-GRAN</b>	74474.458	0.0101	0.0002
<b>SFER-CORD</b>	206559.205	0.0091	0.0004

Tabla 5.1: Longitud en metros y error de las baselíneas de la campaña ROA-FEB1998.

En el procesado de los datos las ambigüedades han sido resueltas utilizando el algoritmo QIF

(*Quasi Ionosphere Free*) del software Bernese 4.2, como ya hemos dicho. En la tabla 5.2 se muestra el porcentaje de ambigüedades resueltas por cada una de las baselíneas y por cada sesión.

Baselínea	054	055	056	057	058
<b>CORD-MOYA</b>	77.7	85.1	90.7	94.2	85.8
<b>CORD-WTZR</b>	87.5	68.9	73.5	71.0	78.4
<b>GRAN-GRAS</b>	67.5	69.6	74.5	68.9	77.9
<b>GRAN-GUVI</b>	70.8	69.2	74.3	71.8	72.3
<b>GUVI-MATE</b>	83.3	76.9	85.7	80.7	88.4
<b>MAS1-SFER</b>	26.4	52.6	51.5	50.0	46.8
<b>MOYA-GRAN</b>	73.9	73.9	75.0	75.3	77.6
<b>SFER-CORD</b>	63.6	71.4	71.4	69.2	64.4

Tabla 5.2: Porcentaje de ambigüedades resueltas por cada sesión.

Una vez que se han combinado las ecuaciones normales y antes de proceder a la solución, se han obtenido los porcentajes de error dado en partes por millón de cada una de las baselíneas, ya reflejado en la tabla 5.1. En el gráfico 5.1 se pueden observar dichos errores en cada una de las baselíneas procesadas.

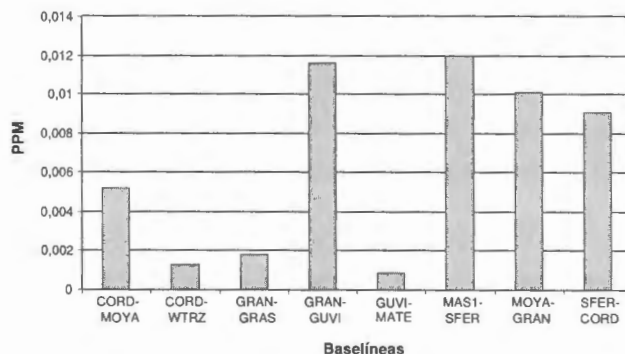


Figura 5.1: PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en el procesado de los datos.

Una primera solución que se ha obtenido es una solución libre, sin constreñimientos, en la que se ha fijado solamente la estación de Wettzell en la época 1998.15. El error por unidad de peso en dicha solución es de 1,1 milímetros. Para chequear la calidad de dicha solución se han comparado las coordenadas ITRF94 época 1998.15 de las estaciones IGS con las coordenadas obtenidas en dicha solución. Se ha utilizado la transformación de 7 parámetros de Helmert [10], obteniendo como resultado el dado en la tabla 5.3.

La solución final fue constreñida con las coordenadas ITRF94 época 1998.15 de las estaciones

Estación	ID	RMS		
		North (mm)	East (mm)	Up (mm)
Grasse	GRAS	2.0	2.0	-5.1
Maspalomas	MAS1	0.2	-2.8	0.7
Matera	MATE	6.1	4.0	1.7
Wetzell	WTRZ	-8.4	-3.2	2.7
Combinación		6.1	3.6	3.5

Tabla 5.3: Residuos entre la solución libre y las del ITRF94 (1998.15) de las estaciones IGS.

IGS. El error por unidad de peso de la solución es de 1,2 mm. En la tabla 5.5 se muestra los residuos de cada una de las estaciones en la solución ajustada y por cada sesión.

Estación	Comp.	RMS	054	055	056	057	058
CORD	N	2.8	-5.3	0.1	-0.2	1.4	0.0
	E	1.8	-2.0	-0.7	-1.8	1.5	1.4
	U	7.4	-3.8	11.2	-6.7	-5.6	-1.6
GRAN	N	3.4	-6.3	0.8	-0.9	2.3	-0.5
	E	1.1	-0.8	-0.2	-1.8	0.2	1.0
	U	6.5	-1.5	9.3	-6.9	-5.5	0.6
GUVI	N	2.6	-5.1	0.4	-0.4	0.8	0.2
	E	1.7	-2.1	0.4	-2.1	-0.1	1.7
	U	6.1	-8.0	7.6	-4.2	-2.6	-0.3
MOYA	N	3.3	-6.4	0.3	-0.2	1.8	-0.2
	E	1.6	-1.6	-0.5	-1.8	-0.1	1.9
	U	6.1	-2.2	8.4	-2.5	-8.3	-0.3
SFER	N	7.1	-13.6	-0.5	2.3	0.3	3.6
	E	2.9	-3.6	0.0	-3.4	3.1	0.1
	U	116.1	-193.9	27.2	90.9	-26.1	81.2
Combinación	N	2.8	6.3	0.4	0.9	1.2	1.3
	E	1.3	1.8	0.3	1.8	1.2	1.1
	U	35.2	68.6	11.6	32.4	10.1	28.7

Tabla 5.4: Precisión de las coordenadas de los vértices de la red ROA-FEB1998 en milímetros.

En el gráfico 5.2 se han representado los residuos anteriores de cada una de las coordenadas de las estaciones reflejados en la tabla anterior. En él se observa la buena calidad de los resultados en las componentes horizontales, aunque en la componente vertical se desvía un poco.

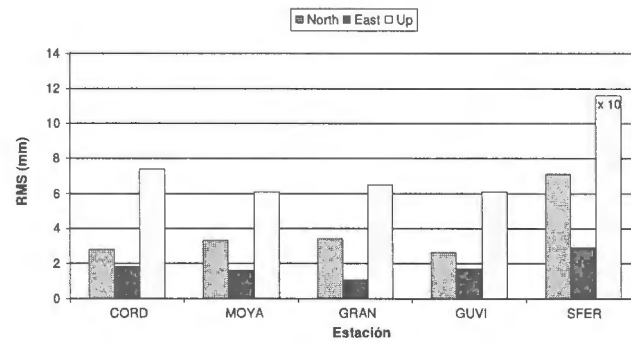


Figura 5.2: Error cuadrático medio diario de cada una de las estaciones en la solución ajustada.

Las coordenadas que se han obtenido en dicha solución han sido las tomadas como coordenadas finales para esta campaña en el ITRF94 época 1998.15 (Tabla 5.5)

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>CORD</b>	5027021.3589	-408079.6031	3891771.6597
<b>GRAN</b>	5077906.4018	-319058.5706	3834733.3560
<b>GUVI</b>	5113592.3868	-253743.8455	3790966.8923
<b>MOYA</b>	5105307.7992	-373731.1923	3792230.2646
<b>SFER</b>	5105519.3182	-555146.0061	3769803.4321

Tabla 5.5: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF94 época 1998.15

Finalmente hemos transformado dichas coordenadas al marco de referencia ITRF2000, época 1998.15. Se ha utilizado el modelo dado en 1.2 y los parámetros utilizados en dicha transformación vienen dados en la tabla 1.2. Dichas coordenadas vienen reflejadas en la tabla 5.6

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>CORD</b>	5027021.3520	-408079.6090	3891771.6785
<b>GRAN</b>	5077906.3946	-319058.5707	3834733.3746
<b>GUVI</b>	5113592.3803	-253743.8514	3790966.9113
<b>MOYA</b>	5105307.7920	-373731.1982	3792230.2833
<b>SFER</b>	5105519.4268	-555146.1457	3769803.2649

Tabla 5.6: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF2000 época 1998.15.

## 5.2. Campaña Septiembre de 1998

Aquí también se han unido las estaciones IGS con alguna de las estaciones de la red. El rango de longitud de las líneas oscila entre 1697310.9203 y 307883.2106 metros como se observa en la tabla 5.7.

Baselínea	Longitud	PPM	RMS
<b>CART-MELI</b>	307883.2106	0.0054	0.0002
<b>CART-WTZR</b>	1697310.9203	0.0015	0.0003
<b>MELI-MATE</b>	1814877.2226	0.0024	0.0002
<b>CAST-SFER</b>	186321.8256	0.0053	0.0002
<b>SFER-CART</b>	478449.1215	0.0020	0.0002
<b>HERS-CAST</b>	1512794.6973	0.0015	0.0003
<b>MAS1-SFER</b>	1308692.8355	0.0010	0.0003

Tabla 5.7: Longitud en metros y error de las baselíneas de la campaña ROA-SEP1998.

En el procesado de los datos las ambigüedades han sido resueltas también utilizando la misma estrategia que la campaña anterior. En la tabla 5.8 se muestra el porcentaje de ambigüedades resueltas por cada una de las baselíneas y por cada sesión.

Baselínea	257	258	259	260	261
<b>CART-MELI</b>	56.2	69.6	65.6	63.0	58.7
<b>CART-WTZR</b>	75.0	73.0	71.1	77.3	71.4
<b>MELI-MATE</b>	82.1	82.7	87.5	73.0	77.5
<b>CAST-SFER</b>	66.9	66.2	58.5	60.2	49.1
<b>SFER-CART</b>	54.2	59.7	44.7	54.5	47.9
<b>HERS-CAST</b>	64.5	82.7	85.1	78.1	87.5
<b>MAS1-SFER</b>	39.1	59.7	46.5	52.6	56.0

Tabla 5.8: Porcentaje de ambigüedades resueltas por cada sesión.

Al igual que la campaña anterior se ha representado gráficamente (Figura 5.3) el error en la longitud de las baselíneas. Dicho error viene dado en partes por millón de cada una de las longitudes, y ya se ha reflejado en la tabla 5.7.

También, siguiendo el esquema de la campaña anterior, se ha obtenido primero una solución libre, en la que sólo se ha fijado la estación de Wettzell en la época 1998.70. El error por unidad de peso en dicha solución es de 1,3 milímetros. Para chequear la calidad de dicha solución se han comparado las coordenadas ITRF96 época 1998.70 de las estaciones IGS con las coordenadas

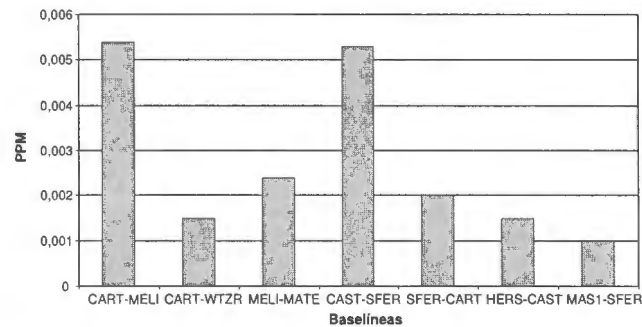


Figura 5.3: PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en el procesado de los datos.

obtenidas en dicha solución. Se ha utilizado la transformación de 7 parámetros de Helmert [10], obteniendo como resultado el dado en la tabla 5.9

Estación	ID	RMS		
		North(mm)	East(mm)	Up(mm)
Herstmonceux	HERS	17.1	12.5	-4.7
Maspalomas	MAS1	-6.5	4.5	1.0
Matera	MATE	-9.5	-5.5	-6.5
Wetzell	WTRZ	-1.1	-11.5	10.2
Combinación		6.1	3.6	3.5

Tabla 5.9: Residuos entre la solución libre y las del ITRF96 (1998.70) de las estaciones IGS.

La solución final fue constreñida con las coordenadas ITRF96 época 1998.70 de las estaciones IGS. El error por unidad de peso de la solución es de 1,3 mm. En la tabla 5.10 se muestra los residuos de cada una de las estaciones en la solución ajustada. En el gráfico 5.4 se han representado dichos residuos de cada una de las coordenadas de las estaciones.

Las coordenadas que se han obtenido en dicha solución han sido las tomadas como coordenadas finales para esta campaña en el ITRF96 época 1998.70 (Tabla 5.11)

Finalmente, al igual que la campaña anterior, hemos transformado dichas coordenadas al marco de referencia ITRF2000, época 1998.70. Se ha utilizado el modelo dado en 1.2 y los parámetros utilizados en dicha transformación vienen dados en la tabla 1.2, los mismos que para el ITRF94. Las coordenadas obtenidas en dicha transformación y que después utilizaremos para determinar las velocidades vienen reflejadas en la tabla 5.12

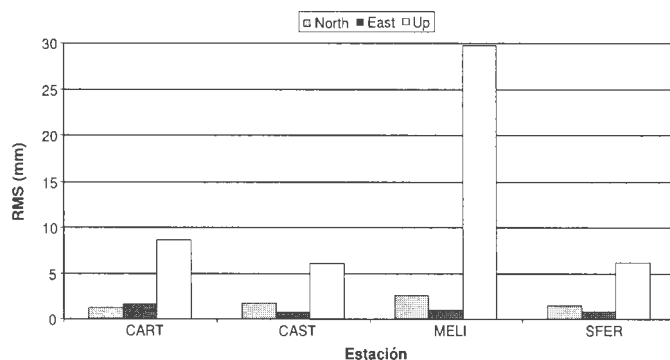


Figura 5.4: Error cuadrático medio diario de cada una de las estaciones en la solución ajustada.

Estación	Comp.	RMS	257	258	259	260	261
CART	N	1.2	-1.6	-0.3	1.6	0.3	-0.1
	E	1.6	-2.2	-0.8	2.0	0.5	0.3
	U	8.7	2.4	14.2	-2.6	-6.1	-7.2
CAST	N	1.7	-2.2	0.2	1.9	-1.0	1.4
	E	0.8	-0.9	-0.8	1.2	0.2	0.1
	U	6.0	9.3	-2.8	-3.5	3.0	-5.3
MELI	N	2.6	-4.4	1.1	1.7	-0.2	1.9
	E	1.0	-1.5	0.0	1.1	0.6	-0.6
	U	29.7	8.6	19.7	9.5	6.1	-54.3
SFER	N	1.5	-2.5	1.2	1.4	-0.2	0.0
	E	0.9	-1.6	0.4	0.4	0.2	0.5
	U	6.2	9.5	0.0	0.5	-8.0	-0.2
Combinación	N	1.2	2.1	0.6	1.3	0.4	0.9
	E	0.7	1.2	0.5	1.0	0.3	0.3
	U	10.3	6.0	9.3	4.0	4.6	20.8

Tabla 5.10: Precisión de las coordenadas de los vértices de la red ROA-FEB1998 en milímetros.

### 5.3. Campaña Octubre de 1999

Al igual que las campañas anteriores a la hora de determinar las baselíneas se han unido las estaciones IGS con alguna de las estaciones de la zona de estudio. Tanto la longitud como los errores en dichas baselíneas vienen reflejadas en la tabla 5.13. El rango de longitud de las líneas oscila entre 1678447.3485 y 510002.9984 metros.

Al igual que la campaña anterior se ha representado gráficamente (Figura 5.5) el error en la

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>CART</b>	5059822.1042	-89383.4410	3869254.8777
<b>CAST</b>	4992028.4760	-571607.1049	3916652.6441
<b>MELI</b>	5205105.7482	-267253.7741	3664201.5217
<b>SFER</b>	5105519.0205	-555145.9599	3769803.2324

Tabla 5.11: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF96 época 1998.70

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>CART</b>	5059822.0966	-89383.4465	3869254.8960
<b>CAST</b>	4992028.4670	-571607.1105	3916652.6614
<b>MELI</b>	5205105.7389	-267253.7796	3664201.5396
<b>SFER</b>	5105519.0116	-555146.9653	3769803.2500

Tabla 5.12: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF2000 época 1998.70

Baselínea	Longitud	PPM	RMS	Baselínea	Longitud	PPM	RMS
<b>ALAC-MAHO</b>	445554.125	0.0012	0.0004	<b>HACH-MELI</b>	223561.947	0.0095	0.0002
<b>MAHO-WTZR</b>	1231035.210	0.0029	0.0007	<b>MAS1-HACH</b>	1326900.921	0.0039	0.0003
<b>CART-ALAC</b>	95634.841	0.0140	0.0002	<b>SFER-HERS</b>	1678447.348	0.0009	0.0003
<b>CART-MATE</b>	1562666.153	0.0009	0.0003	<b>SFER-TARI</b>	54720.781	0.0228	0.0002
<b>CART-MELI</b>	307883.214	0.0025	0.0002	<b>TARI-HACH</b>	51002.984	0.0322	0.0002

Tabla 5.13: Longitud en metros y error de las baselíneas de la campaña ROA-OCT1999.

longitud de las baselíneas. Dicho error viene dado en partes por millón de cada una de las longitudes, y ya se ha reflejado en la tabla anterior.

En el procesado de los datos las ambigüedades han sido resueltas también utilizando la misma estrategia que las campañas anteriores. En la tabla 5.14 se muestra el porcentaje de ambigüedades resueltas por cada una de las baselíneas y por cada sesión.

También se ha obtenido primero una solución libre, en la que sólo se ha fijado la estación de Wettzell en la época 1999.74. El error por unidad de peso en dicha solución es de 1,5 milímetros. Para chequear la calidad de dicha solución se han comparado las coordenadas ITRF97 época 1999.74 de las estaciones IGS con las coordenadas obtenidas en dicha solución 5.15.

Por último se obtuvo una solución constreñida con las coordenadas ITRF97 época 1999.74 de las estaciones IGS. El error por unidad de peso de la solución es de 1,6 mm. En la tabla 5.16 se



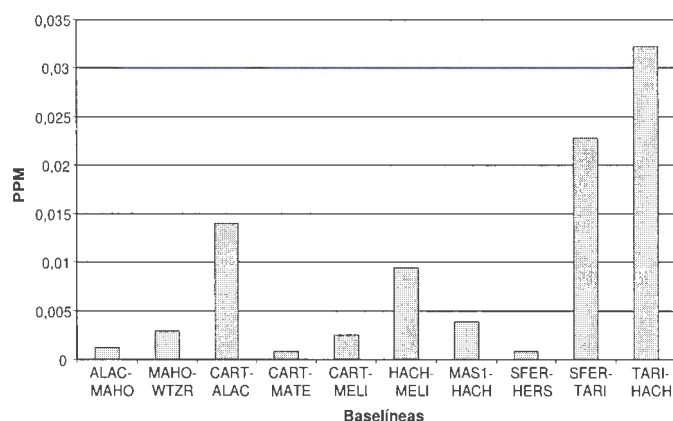


Figura 5.5: PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en la campaña ROA-OCT1999.

Baselínea	272	273	274
ALAC-MAHO	72.0	69.1	66.6
MAHO-WTZR	55.1	69.0	57.5
CART-ALAC	91.8	82.2	89.3
CART-MATE	86.3	90.9	83.7
CART-MELI	78.0	77.7	79.5

Baselínea	272	273	274
HACH-MELI	84.4	70.3	77.4
MAS1-HACH	46.0	64.9	69.5
SFER-HERS	83.9	90.1	75.0
SFER-TARI	90.0	96.4	92.3
TARI-HACH	92.0	88.5	96.3

Tabla 5.14: Porcentaje de ambigüedades resueltas por cada sesión.

Estación	ID	RMS		
		North(mm)	East(mm)	Up(mm)
Herstmonceux	HERS	-2.4	24.2	-7.5
Maspalomas	MAS1	1.1	-3.8	6.9
Matera	MATE	-5.0	-15.8	-26.4
Wettzell	WTRZ	6.3	-4.7	27.0
Combinación		4.9	17.0	22.6

Tabla 5.15: Residuos entre la solución libre y las del ITRF97 (1999.74) de las estaciones IGS.

muestra los residuos de cada una de las estaciones en la solución ajustada y por cada sesión.

En el gráfico 5.6 se han representado los residuos anteriores de cada una de las coordenadas de las estaciones reflejados en la tabla anterior.

Las coordenadas que se han obtenido en dicha solución han sido las tomadas como coordenadas finales para esta campaña en el ITRF97 época 1999.74 (Tabla 5.17)

Estación	C.	RMS	272	273	274	Estación	C.	RMS	272	273	274
ALAC	N	3.5	0.8	1.7	-4.7	MELI	N	2.6	1.0	0.2	-3.5
	E	1.7	-1.9	1.3	0.5		E	2.4	-2.2	2.6	-0.4
	U	11.9	-9.4	2.6	13.6		U	12.2	-11.3	6.2	11.5
CART	N	3.8	1.7	0.7	-5.1	SFER	N	1.6	0.3	0.7	-2.2
	E	1.7	-1.7	-0.2	1.7		E	2.2	-2.2	2.0	-0.6
	U	16.7	-14.8	5.4	17.6		U	9.9	-10.4	9.3	-0.9
HACH	N	3.1	1.3	0.5	-4.2	TARI	N	2.0	-0.2	1.3	-2.6
	E	4.4	-4.7	3.4	2.4		E	3.6	-3.8	2.9	1.7
	U	16.2	-15.9	11.9	11.5		U	14.0	-14.3	13.0	4.0
MAHO	N	2.9	0.8	0.8	-3.9	Comb.	N	1.9	0.8	0.8	3.2
	E	1.4	-0.6	0.9	-1.6		E	1.8	2.3	1.8	1.2
	U	18.8	-17.1	19.5	6.0		U	9.6	11.4	9.2	9.0

Tabla 5.16: Precisión de las coordenadas de los vértices de la red ROA-OCT1999 en milímetros.

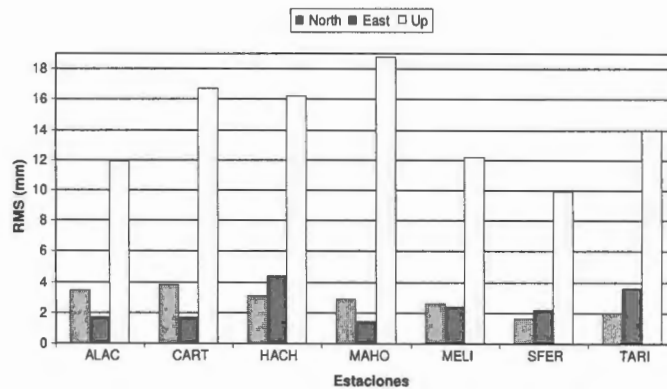


Figura 5.6: Error cuadrático medio diario de cada una de las estaciones en la solución ajustada.

Finalmente hemos transformado dichas coordenadas al marco de referencia ITRF2000, época 1999.74. Se ha utilizado el modelo dado en 1.2 y los parámetros utilizados en dicha transformación vienen dados en la tabla 1.2, los mismos que para el ITRF94. Las coordenadas obtenidas en dicha transformación vienen reflejadas en la tabla 5.18

Estas últimas coordenadas en el sistema ITRF2000 han sido comparadas con las soluciones finales de la anterior campaña como una medida externa de la precisión. El resultado de dicha comparación se refleja en la tabla 5.19.

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ALAC	5009051.2379	-42072.3108	3935057.6247
CART	5059821.9817	-89383.4320	3869254.7955
HACH	5150995.6188	-477172.2232	3718848.4422
MAHO	4886508.5466	364717.1740	4069311.4227
MELI	5205105.6811	-267253.7741	3664201.4808
SFER	5105519.0593	-555145.9684	3769803.2691
TARI	5133509.9013	-521551.3423	3736905.2781

Tabla 5.17: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF97 época 1999.74

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ALAC	5009051.2311	-42072.3168	3935057.6431
CART	5059821.9817	-89383.4380	3869254.8139
HACH	5150995.6120	-477172.2292	3718848.4606
MAHO	4886508.5398	364717.1678	4069311.4411
MELI	5205105.6743	-267253.7801	3664201.4992
SFER	5105519.0525	-555145.9744	3769803.2875
TARI	5133509.8945	-521551.3483	3736905.2965

Tabla 5.18: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF2000 época 1999.74

Campaña Septiembre 1998			
	North(m)	East(m)	Up(m)
CART	0.0011	-0.0018	0.0001
MELI	-0.0030	0.0011	0.0001
SFER	0.0019	0.0007	-0.0001

Tabla 5.19: Comparación de coordenadas en ITRF2000 con campañas anteriores.

## 5.4. Campaña Septiembre de 2001

El rango de longitud de las líneas oscila entre 1603352.5955 metros y 87794.7061 metros. En la tabla 5.20 se refleja la longitud de cada una de las líneas, así como su error.

En el procesado de los datos las ambigüedades han sido también resueltas utilizando el algoritmo QIF. En la tabla (5.21) se muestra el porcentaje de ambigüedades resueltas por cada una de las

Baselínea	Longitud	RMS	PPM	Baselínea	Longitud	RMS	PPM
ALAC-MAHO	445554.130	0.0002	0.003	CEUT-MALA	123602.163	0.0002	0.005
ALAC-WTZR	1603352.595	0.0002	0.001	MALA-MELI	206350.881	0.0002	0.005
MAHO-GRAS	481641.276	0.0002	0.004	MALA-GRAN	87894.706	0.0002	0.011
ALME-CART	152123.586	0.0002	0.008	MELI-ALME	178691.685	0.0002	0.010
CART-ALAC	95634.839	0.0002	0.013	MAS1-CEUT	1325698.988	0.0002	0.001
CART-MATE	1562666.143	0.0002	0.001	SFER-CEUT	102218.374	0.0002	0.007

Tabla 5.20: Longitud en metros y error de las baselíneas.

baselíneas y por cada sesión.

Baselínea	252	253	254	255	256	Baselínea	252	253	254	255	256
ALAC-MAHO	83.3	81.0	71.4	86.5	88.3	CEUT-MALA	94.2	90.0	84.0	87.3	89.2
ALAC-WTZR	89.3	89.7	77.1	87.7	87.9	MALA-MELI	79.7	80.0	73.4	84.7	79.3
MAHO-GRAS	73.7	68.5	72.5	69.1	77.0	MALA-GRAN	86.3	80.9	80.3	82.1	83.0
ALME-CART	87.2	91.0	87.7	86.8	85.1	MELI-ALME	87.6	79.0	74.6	80.5	81.8
CART-ALAC	88.4	90.5	88.4	94.1	88.0	MAS1-CEUT	56.0	64.5	61.5	78.3	54.4
CART-MATE	91.1	83.6	65.4	81.4	89.1	SFER-CEUT	95.2	90.6	92.7	93.6	84.7

Tabla 5.21: Porcentaje de Ambigüedades resueltas en cada sesión.

Al igual que las campañas anteriores se ha representado gráficamente (Figura 5.7) el error en la longitud de las baselíneas. Dicho error viene dado en partes por millón de cada una de las longitudes, y ya se ha reflejado en la tabla 5.20.

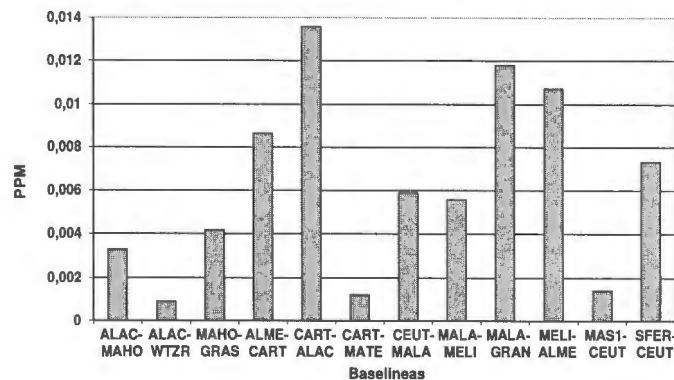


Figura 5.7: PPM de las diferentes baselíneas utilizadas en el procesado de los datos.

En primer lugar se ha considerado una solución libre, en la solo se ha fijado la estación de Wettzell (WTRZ) con sus coordenadas en el ITRF97 época 2001.73. El error por unidad de peso en dicha solución es de 1.3 mm.

Para chequear la calidad de dicha la solución libre se han comparado las coordenadas ITRF97 época 2001.73 de las estaciones IGS con las coordenadas obtenidas en dicha solución. Los resultados se observan en la tabla (5.22).

Estación	ID	RMS		
		North(mm)	East(mm)	Up(mm)
Grasse	GRAS	5.7	-11.4	1.6
Maspalomas	MAS1	0.1	3.4	0.2
Matera	MATE	-5.9	5.6	-2.0
Wetzell	WTRZ	0.1	2.5	0.3
Combinación		4.7	7.7	1.5

Tabla 5.22: Residuos entre la solución libre y las del ITRF97 (2001.73) de las estaciones IGS.

Finalmente la solución final fue constreñida con las coordenadas ITRF97 época 2001.73 de las estaciones IGS. El error por unidad de peso de la solución es también de 1,3 mm. En la tabla 5.23 se muestra el RMS de cada una de las coordenadas de las estaciones en la solución final y por cada sesión, expresado en milímetros.

En el gráfico 5.8 se ha representado el RMS de cada una de las coordenadas de las estaciones reflejados en la tabla anterior.

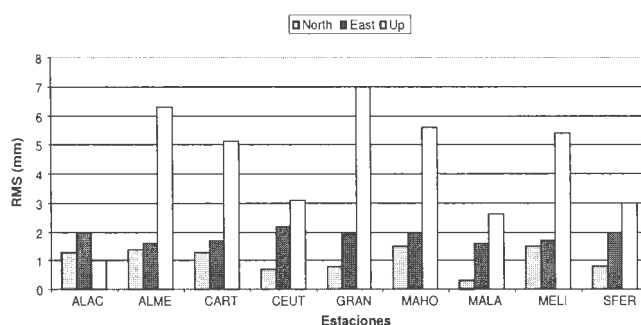


Figura 5.8: Error cuadrático medio diario de las estaciones.

Las coordenadas que se han obtenido en dicha solución han sido las tomadas como las coordenadas finales para esta campaña en el ITRF97 época 2001.73 (Tabla 5.24).

Finalmente estas coordenadas finales las hemos transformado al marco de referencia ITRF2000, época 2001.73 usando el modelo dado en la ecuación (1.2). Los parámetros usado en dicha transformación vienen dados en la tabla 1.2 y coinciden con los del ITRF96. Las coordenadas finales obtenidas vienen dadas en la tabla 5.25

Estas últimas coordenadas en el sistema ITRF2000 han sido comparadas con las soluciones

Estación	Comp.	RMS	252	253	254	255	256
ALAC	N	1.3	-1.7	1.6	0.3	0.6	-0.9
	E	2.0	-1.2	-2.4	-0.2	2.9	0.7
	U	1.0	-0.3	1.4	-0.8	1.2	-0.6
ALME	N	1.4	1.6	1.0	-1.8	-1.1	0.4
	E	1.6	0.4	-1.2	-1.5	2.5	-0.8
	U	6.3	-4.7	10.3	-3.8	2.2	-3.0
CART	N	1.3	-1.1	0.8	1.9	-0.4	-1.2
	E	1.7	1.1	-1.1	-1.3	2.3	-1.5
	U	5.1	-0.7	7.8	-4.9	-3.8	2.1
CEUT	N	0.7	1.2	-0.3	0.0	-0.3	-0.7
	E	2.2	-0.3	-2.9	-0.4	3.4	-0.3
	U	3.1	-4.1	1.6	-1.0	4.4	-0.2
GRAN	N	0.8	0.5	-0.7	-0.4	1.1	-0.6
	E	1.9	0.8	-2.0	-0.9	2.7	-1.1
	U	7.0	-9.6	6.7	6.7	0.9	-3.3
MAHO	N	1.5	0.1	1.5	-1.6	1.3	-1.5
	E	2.0	-0.6	-1.4	0.2	3.3	-1.8
	U	5.6	-1.0	5.8	-2.4	-6.8	6.1
MALA	N	0.3	0.4	-0.5	0.1	0.1	-0.2
	E	1.6	0.3	-1.8	-1.6	2.1	0.5
	U	2.6	-2.4	-0.6	3.6	-2.0	2.2
MELI	N	1.5	1.6	-1.9	-0.6	-0.7	1.4
	E	1.7	0.4	-2.2	-1.3	2.3	0.3
	U	5.4	-8.3	3.3	5.5	2.3	-1.5
SFER	N	0.8	0.6	-0.5	0.1	0.8	-1.2
	E	2.0	-1.0	-1.5	-1.1	3.5	-0.4
	U	3.0	-3.6	2.2	-1.6	3.9	-0.3
Combinación	N	0.9	1.0	1.0	0.9	0.7	0.9
	E	1.4	0.7	1.7	0.9	2.4	0.8
	U	3.5	4.3	4.7	3.4	3.0	2.4

Tabla 5.23: Precisión de las coordenadas de los vértices de la red ROA-SEP2001.

finales de otras campañas, al igual que hemos hecho anteriormente, como una medida externa de la precisión. El resultado de dicha comparación se refleja en la tabla (5.26).

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ALAC	5009051.2257	-42072.2576	3935057.6505
ALME	5105220.1308	-219278.5816	3804387.0441
CART	5059821.9697	-89383.3789	3869254.8242
CEUT	5150601.8239	-478834.4352	3718884.7626
GRAN	5077906.2936	-319058.5094	3834733.3419
MAHO	4886508.6178	364717.2391	4069311.5050
MALA	5103282.2442	-392096.5261	3793147.0499
MELI	5205105.6549	-267253.7248	3664201.5023
SFER	5105519.0337	-555145.9161	3769803.2858

Tabla 5.24: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF97 época 2001.73.

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ALAC	5009051.2189	-42072.2514	3935057.6689
ALME	5105220.1240	-219278.5876	3804387.0625
CART	5059821.9626	-89383.3849	3869254.8426
CEUT	5150601.8171	-478834.4412	3718884.7810
GRAN	5077906.2868	-319058.5154	3834733.3603
MAHO	4886508.6110	364717.2329	4069311.5234
MALA	5103282.2374	-392096.5321	3793147.0683
MELI	5205105.6481	-267253.7308	3664201.5207
SFER	5105519.0269	-555145.9221	3769803.3042

Tabla 5.25: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF2000 época 2001.73.

## 5.5. Campañas Episódicas

### 5.5.1. Campaña Episódica de Ceuta

Durante un periodo de dos horas se observó la estación situada en Monte Hacho para su posterior enlace con la estación permanente de Ceuta. La única baselina formada es la de CEUT-HACH y se trata de determinar exactamente las componentes de dichas baselina ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ). La longitud de la misma es 1709.152 metros.

En el procesado sólo ha existido una sesión de dos horas y en donde se han resuelto el 77.7% de las ambigüedades. En este tipo de campaña no ha realizado ningún ajuste, pues no existen

Campaña Septiembre 1998				Campaña Octubre 1999			
	North(m)	East(m)	Up(m)		North(m)	East(m)	Up(m)
<b>CART</b>	0.0003	-0.0039	-0.0001	<b>ALAC</b>	-0.0005	-0.0072	0.0274
<b>MELI</b>	-0.0039	0.0043	0.0002	<b>CART</b>	-0.0063	0.0037	0.0195
<b>SFER</b>	0.0037	-0.0005	0.0000	<b>MAHO</b>	0.0035	-0.0012	-0.0228
				<b>MELI</b>	-0.0036	0.0028	-0.0073
				<b>SFER</b>	0.0069	-0.0006	-0.0169

Tabla 5.26: Comparación de coordenadas en ITRF2000 con campañas anteriores.

varias ecuaciones normales.

Finalmente las coordenadas que se han obtenido en dicho procesado son (Tabla 5.27).

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>CEUT</b>	5150602.3839	-478835.1311	3718885.4717
<b>HACH</b>	5150996.0443	-477172.8175	3718849.1337

Tabla 5.27: Coordenadas finales de la campaña episódica de Ceuta.

Y por lo tanto haciendo la diferencia de dichas coordenadas obtendremos las componentes de la base línea y que consideramos constantes a lo largo de las diferentes campañas.

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 393,6604 \\ 1662,3136 \\ -36,3380 \end{pmatrix}$$

Llevádonos dicho resultado a la campaña de Octubre de 1999, tendremos las coordenadas de Ceuta en el ITRF de la campaña, ITRF97, época 1999.74.

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>CEUT</b>	5150602.0800	-478834.7088	3718884.5921

Tabla 5.28: Coordenadas de Ceuta en el ITRF97, época 1999.74.

### 5.5.2. Campaña Episódica de Almería

En esta campaña se observó durante dos horas la estación de Guardas-Viejas, y posteriormente se procesaron dichos datos junto con la estación permanente de Almería. La única base línea



formada es la de ALME-GUVI y se trata de determinar exactamente las componentes de dichas baselina ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ). La longitud de la misma es 37921.415 metros.

En este procesado sólo ha existido una sesión de dos horas y en donde se han resuelto el 87.5% de las ambigüedades. En este tipo de campaña no ha realizado ningún ajuste, pues no existen varias ecuaciones normales.

Finalmente las coordenadas que se han obtenido en dicho procesado son (Tabla 5.29).

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ALME	5105220.8513	-219278.6692	3804387.9843
GUVI	5113593.0400	-253743.8716	3790967.8370

Tabla 5.29: Coordenadas finales de la campaña episódica de Almería.

Por lo tanto haciendo la diferencia de dichas coordenadas obtendremos las componentes de la baselina y que consideramos constantes.

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8372,1887 \\ -34465,2024 \\ -13420,1473 \end{pmatrix}$$

Llevándonos dicho resultado a la campaña de Febrero de 1998, tendremos las coordenadas de Almería en el ITRF de la campaña, ITRF94, época 1998.15.

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
ALME	5105220.3158	-219278.7831	3804386.8749

Tabla 5.30: Coordenadas de Almería en el ITRF94, época 1998.15.

### 5.5.3. Campaña Episódica de Málaga

También durante un periodo de dos horas se observó la estación situada en Torre Moya con el proposito de unirla a la estación permanente de Málaga y determinar así las componentes de la baselina MALA-MOYA. La longitud de la misma es 18499,366 metros.

En el procesado sólo ha existido una sesión de dos horas y en donde se han resuelto el 86.6% de las ambigüedades. Las coordenadas que se han obtenido en dicho procesado son (Tabla 5.31).

Y por lo tanto haciendo la diferencia de dichas coordenadas obtendremos las componentes de la

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>MALA</b>	5103282.9782	-392096.5677	3793147.8459
<b>MOYA</b>	5105308.4999	-373731.1762	3792231.0950

Tabla 5.31: Coordenadas finales de la campaña episódica de Málaga.

baselínea y que consideramos constantes a lo largo de las diferentes campañas.

$$\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2025,5217 \\ 18365,3915 \\ -916,7509 \end{pmatrix}$$

Llevándonos dicho resultado a la campaña de Febrero de 1998, tendremos las coordenadas de Málaga en el ITRF de la campaña, ITRF94, época 1998.15.

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>MALA</b>	5103282.3918	-392096.7236	3793146.8499

Tabla 5.32: Coordenadas de Málaga en el ITRF94, época 1998.15.

## 5.6. Campaña Diciembre de 2003

En esta última campaña es donde más estaciones se han considerado. Las baselíneas formadas en esta campaña vienen reflejadas en la tabla 5.33. El rango de longitud oscila entre 1512794.7127 y 72624.4953 metros. En la tabla mencionada también se refleja la longitud de cada una de las líneas, así como su RMS y su error en partes por millón

También se han representado el error en partes por millón de las longitudes de las baselíneas (Figura 5.9)

En el procesado de los datos las ambigüedades han sido resueltas utilizando el algoritmo QIF. En la tabla 5.34 se muestra el porcentaje de ambigüedades resueltas por cada una de las baselíneas y por cada sesión.

Puede observarse en la tabla anterior que el primer día el porcentaje de ambigüedades es menor que el resto de sesiones para las baselíneas que contengan datos de Segura de León y Córdoba. Esto es debido a que los ficheros correspondiente a dichas estaciones y dicha sesión no son de 24 horas.

Baselínea	Longitud	RMS	PPM
ALBO-MELI	72624.495	0.0002	0.026
MELI-ALME	178691.683	0.0002	0.007
ALAC-MAHO	445554.123	0.0002	0.002
MAHO-WTZR	1231035.218	0.0002	0.001
ALME-CART	152123.592	0.0002	0.007
CART-ALAC	95634.839	0.0002	0.014
CART-MATE	1562666.153	0.0002	0.002
CEUT-MALA	123602.153	0.0002	0.007

Baselínea	Longitud	RMS	PPM
MALA-ALBO	150019.121	0.0002	0.012
CORD-GRAN	117334.551	0.0003	0.010
CAST-CORD	169070.427	0.0002	0.009
CAST-HERS	1512794.712	0.0003	0.001
MAS1-CEUT	1325698.992	0.0002	0.001
SFER-CEUT	102218.376	0.0001	0.005
SFER-CAST	186321.805	0.0002	0.006

Tabla 5.33: Longitud en metros y error de las baselíneas.

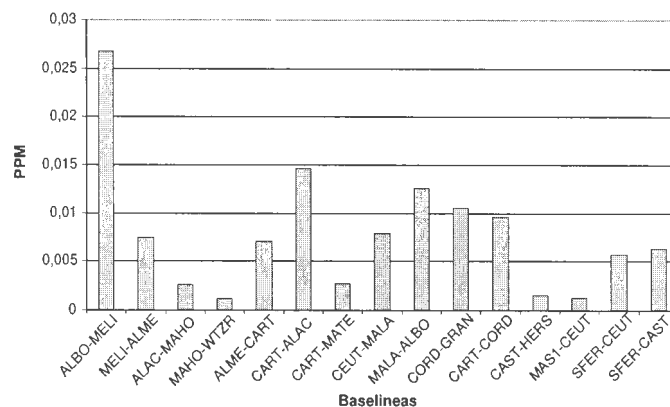


Figura 5.9: PPM de las baselíneas utilizadas en el campaña ROA-DIC2003.

Baselínea	343	344	345	346	347
ALBO-MELI	61.5	70.1	75.0	80.0	72.7
ALAC-MAHO	75.0	84.5	82.8	88.5	80.5
ALME-CART	88.5	87.9	90.0	92.8	90.3
CART-ALAC	92.9	90.1	88.1	94.8	89.6
CART-MATE	85.1	79.2	80.2	86.0	90.7
MAHO-WTRZ	77.4	82.4	85.7	81.6	81.8
MELI-ALME	70.8	60.5	76.1	78.7	73.6
MALA-ALBO	92.3	87.8	91.1	93.2	97.2

Baselínea	343	344	345	346	347
CEUT-MALA	90.6	94.1	96.9	98.5	97.0
CORD-GRAN	72.2	75.9	81.5	75.8	72.1
CAST-CORD	42.8	75.5	92.9	92.6	94.8
CAST-HERS	58.8	71.1	87.5	90.3	88.1
MAS1-CEUT	84.4	84.7	91.6	84.0	89.1
SFER-CEUT	83.3	95.1	96.6	94.8	90.7
SFER-CAST	56.2	78.5	91.6	90.4	91.5

Tabla 5.34: Porcentaje de Ambigüedades resueltas en cada sesión.

En primer lugar se ha considerado una solución libre, en la solo se ha fijado la estación de Wettzell (WTRZ) con sus coordenadas en el ITRF2000 época 2003.94. El error por unidad de peso en dicha solución es de 1,3 mm.

También para chequear la calidad de dicha la solución libre se han comparado las coordenadas ITRF2000 época 2003.94 de las estaciones IGS con las coordenadas obtenidas en dicha solución (Tabla 5.35)

Estación	ID	RMS		
		North(mm)	East(mm)	Up(mm)
Herstmonceux	HERS	-3.2	18.7	0.5
Maspalomas	MAS1	-4.3	-4.9	-0.9
Matera	MATE	4.2	-2.2	0.9
Wettzell	WTRZ	3.3	-11.6	-0.5
Combinación		4.4	13.1	0.8

Tabla 5.35: Residuos entre la solución libre y las del ITRF00 (2003.94) de las estaciones IGS.

Finalmente la solución final fue constreñida con las coordenadas ITRF2000 época 2003.94 de las estaciones IGS. El error por unidad de peso de la solución es de 1,4 mm. En dicha solución no se ha considerado la sesión del día 343 ya que sus ecuaciones normales arrastran un elevado error a la solución final y tiene un residuo muy elevado. En la tabla (5.36) se muestra el RMS de cada una de las coordenadas de las estaciones en la solución final y por cada sesión, expresado en milímetros. Al igual que el resto de las campañas se ha representado dicho RMS de cada una de las coordenadas en el gráfico 5.10. En él se observa la buena calidad de los resultados en las componentes horizontales ya que las coordenadas varían en unos pocos milímetros.

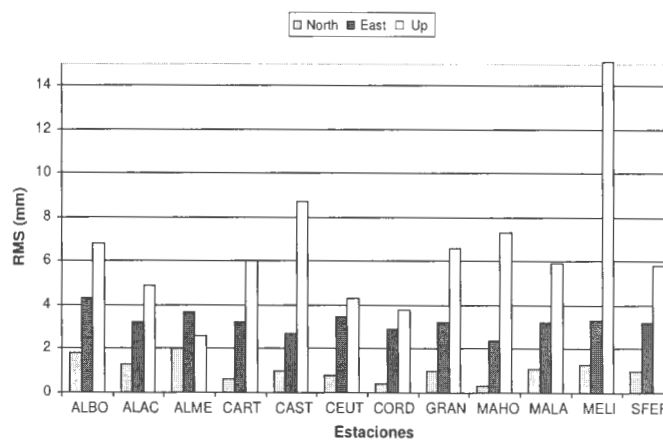


Figura 5.10: Error cuadrático medio diario de las estaciones.

Las coordenadas que se han obtenido en dicha solución han sido las tomadas como las coordenadas finales para esta campaña en el ITRF2000 época 2003.94 (Tabla 5.37).

Estas últimas coordenadas en el sistema ITRF2000 han sido comparadas con las soluciones finales

Estación	Comp.	RMS	344	345	346	347
ALBO	N	1.8	2.4	0.3	-1.8	-0.7
	E	4.3	-6.5	0.7	2.6	2.1
	U	6.8	9.7	-6.5	-1.5	-0.2
ALAC	N	1.3	2.0	-0.8	-0.7	-0.1
	E	3.2	-4.8	1.5	2.3	0.1
	U	4.9	3.8	3.5	-6.4	-1.6
ALME	N	2.0	1.7	0.9	-2.8	0.1
	E	3.7	-5.7	1.4	1.8	1.6
	U	2.6	3.5	-2.7	0.0	-0.7
CART	N	0.6	-0.3	-0.5	0.1	0.8
	E	3.2	-5.0	1.3	1.8	1.1
	U	6.0	8.2	-0.5	-2.2	-6.0
CAST	N	1.0	1.6	-0.4	-0.3	-0.4
	E	2.7	-4.2	1.8	0.6	0.9
	U	8.7	13.7	-5.0	-3.7	0.0
CEUT	N	0.8	0.9	-0.2	-0.9	0.3
	E	3.5	-5.4	1.5	0.7	2.1
	U	4.3	6.4	-3.4	-1.9	0.4
CORD	N	0.1	0.4	-0.4	-0.1	0.0
	E	2.9	-4.3	2.2	0.1	1.1
	U	3.8	5.7	-2.9	-1.8	0.1
GRAN	N	1.0	1.2	0.0	-1.3	0.5
	E	3.2	-4.9	0.7	0.9	2.2
	U	6.6	6.7	-3.6	-7.2	4.8
MAHO	N	0.3	0.4	-0.1	-0.2	-0.3
	E	2.4	-3.5	0.0	1.6	1.2
	U	7.3	10.8	-5.9	-1.8	-2.7
MALA	N	1.1	1.5	-0.6	-0.9	0.3
	E	3.2	-5.0	1.5	1.3	1.1
	U	5.9	8.1	-4.5	-3.8	1.8
MELI	N	1.3	2.0	-0.1	-0.9	-0.6
	E	3.3	-5.2	1.7	1.2	1.2
	U	15.1	20.8	5.4	-7.5	-12.7
SFER	N	1.0	1.4	-0.3	-0.8	-0.2
	E	3.2	-5.1	1.5	1.2	1.3
	U	5.8	8.9	-4.0	-2.8	-0.2
Combinación	N	0.9	1.3	0.4	1.0	0.4
	E	2.5	4.5	1.3	1.1	1.3
	U	5.1	8.9	3.8	3.7	4.0

Tabla 5.36: Precisión de las coordenadas de los vértices de la red ROA-DIC 2003.

Estación	Coordenadas Cartesianas		
	X(m)	Y(m)	Z(m)
<b>ALAC</b>	5009051.1987	-42072.2073	3935057.7100
<b>ALBO</b>	5162721.7360	-273657.7762	3722826.7328
<b>ALME</b>	5105220.0961	-219278.5315	3804387.0950
<b>CART</b>	5059822.0302	-89383.3280	3869254.9522
<b>CAST</b>	4992028.4094	-571606.9903	3916652.6888
<b>CEUT</b>	5150601.8087	-478834.3908	3718884.8270
<b>CORD</b>	5027021.2934	-408079.4817	3891771.7477
<b>GRAN</b>	5077906.2829	-319058.4588	3834733.4074
<b>MAHO</b>	4886508.5797	364717.2818	4069311.5543
<b>MALA</b>	5103282.2294	-392096.4777	3793147.1119
<b>MELI</b>	5205105.6636	-267253.6779	3664201.5878
<b>SFER</b>	5105519.0244	-555145.8754	3769803.3540

Tabla 5.37: Coordenadas finales de las estaciones en el ITRF00 época 2003.94.

de otras campañas como una medida externa de la precisión. El resultado de dicha comparación se refleja en la tablas (5.38) y (5.39).

Campaña Febrero 1998				Campaña Septiembre 1998			
	North(m)	East(m)	Up(m)		North(m)	East(m)	Up(m)
<b>CORD</b>	-0.0031	0.0094	0.1167	<b>CART</b>	-0.0063	-0.0118	-0.0200
<b>GRAN</b>	-0.0024	-0.0060	0.0537	<b>CAST</b>	0.0133	-0.0117	0.0381
<b>SFER</b>	0.0054	-0.0035	-0.1704	<b>MELI</b>	-0.0048	0.0092	0.0340
				<b>SFER</b>	-0.0019	0.0137	-0.0521

Tabla 5.38: Comparación de coordenadas en ITRF2000 con campañas anteriores.

<b>Campaña Octubre 1999</b>				<b>Campaña Septiembre 2001</b>			
	<b>North(m)</b>	<b>East(m)</b>	<b>Up(m)</b>		<b>North(m)</b>	<b>East(m)</b>	<b>Up(m)</b>
<b>ALAC</b>	0.0002	-0.0017	0.0482	<b>ALAC</b>	-0.0002	0.0069	0.0118
<b>CART</b>	-0.0067	-0.0047	-0.0589	<b>ALME</b>	0.0011	-0.0031	0.0377
<b>MAHO</b>	0.0039	0.0017	-0.0018	<b>CART</b>	-0.0013	-0.0069	-0.0896
<b>MELI</b>	-0.0037	0.0011	0.0158	<b>CEUT</b>	-0.0011	0.0036	0.0143
<b>SFER</b>	0.0064	0.0035	-0.0033	<b>GRAN</b>	0.0027	-0.0051	-0.0011
				<b>MAHO</b>	-0.0001	0.0010	0.0214
				<b>MALA</b>	0.0021	-0.0020	0.0075
				<b>MELI</b>	-0.0012	0.0001	0.0046
				<b>SFER</b>	-0.0018	0.0056	-0.0067

Tabla 5.39: Comparación de coordenadas en ITRF2000 con campañas anteriores.





## Capítulo 6

# Desplazamientos horizontales

### 6.1. Método de los mínimos cuadrados

Desarrollemos el modelo que nos va a relacionar las coordenadas de cada estación con el tiempo y obtener así su velocidad. En primer lugar lo veremos para un caso general y en segundo lugar el caso más simple.

Para determinar las velocidades plantearemos un modelo que describe el comportamiento de una magnitud, denominada variable explicada, en función de otras, denominadas variables explicativas. Un modelo no es más que una ecuación matemática que nos relaciona variables matemáticas, variables aleatorias y parámetros. En el caso de que intervengan variables aleatorias, se supondrá que los parámetros que especifican su distribución también forman parte del modelo. Nosotros utilizaremos un modelo lineal

El modelo se caracteriza por un conjunto de  $p$  variables determinísticas  $t_1, t_2, \dots, t_p$  cuyos valores están perfectamente controlados, y de una variable dependiente observable, cuyos valores se obtienen por medición, que viene explicada por

$$y = \beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_p t_p + \varepsilon$$

donde  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  son parámetros y  $\varepsilon$  es una cantidad con comportamiento aleatorio, que engloba los errores de medición.

Si repetimos la experimentación  $n$  veces y llamamos  $X$  a la matriz de los valores controlados de las variables explicativas e  $Y$  al vector  $n \times 1$  de las observaciones de la variable explicada, el resultado de la experimentación puede escribirse como

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

siendo  $\beta$  el vector  $p \times 1$  de los parámetros y  $\varepsilon$  el vector  $n \times 1$  de la variable aleatoria del error. A dicha expresión se le llama ecuación muestral del modelo.

Para la estimación puntual de los parámetros del modelo tomaremos la hipótesis del llamado caso general

$$E[\varepsilon] = 0, \quad \text{Cov}[\varepsilon] = \sigma^2 I,$$

es decir, los errores centrados en cero, están incorrelados y tienen varianza común. Es necesario estimar  $p + 1$  parámetros, a saber  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  y  $\sigma^2$ .

En nuestro caso al no conocerse la distribución de  $\varepsilon$ , para la estimación de los parámetros  $\beta$  se utiliza el principio de los mínimos cuadrados. Se determinan los estimadores de forma que el modelo se ajuste lo mejor posible, según algún criterio de ajuste, a los datos observados: Dado  $Y = X\beta + \varepsilon$ , determinamos  $\hat{\beta}$  de forma que  $Y - X\hat{\beta} = \hat{\varepsilon}$  verifique que  $\hat{\varepsilon}^t \hat{\varepsilon}$  sea mínimo.

Derivando respecto al vector  $\hat{\beta}$  e igualando a cero tendremos las llamadas ecuaciones normales del modelo

$$\frac{\partial \hat{\varepsilon}^t \hat{\varepsilon}}{\partial \hat{\beta}} = -2X^t Y + 2X^t X \hat{\beta} = 0$$

$$X^t X \hat{\beta} - X^t Y = 0$$

asumiendo que  $X^t X$  es una matriz inversible obtenemos como solución a

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t Y$$

### Teorema 6.1. (Gauss-Markov)

En el modelo lineal  $Y = X\beta + \varepsilon$  de rango máximo y bajo la hipótesis de incorrelación

$$E[\varepsilon] = 0, \quad \text{Cov}[\varepsilon] = \sigma^2 I$$

el mejor estimador lineal del parámetro  $\beta$  es el estimador de mínimos cuadrados.

#### 6.1.1. Modelo lineal simple

Aplicando todo lo anterior al modelo de regresión lineal simple dado por

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots$$

en donde la pendiente  $\beta_1$  será la velocidad correspondiente en la dirección de  $y_i$ .

Las observaciones asociadas a esta modelo se expresan como

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Ya hemos visto que los mejores estimadores de los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  es el de mínimos cuadrados y que la solución de las ecuaciones normales viene dada por

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t Y$$

y en nuestro caso dichas matrices vienen dadas por

$$X^t X = \begin{pmatrix} n & \sum t_i \\ \sum t_i & \sum t_i^2 \end{pmatrix}, \quad X^t Y = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum t_i y_i \end{pmatrix}$$

de modo que las ecuaciones normales son

$$\begin{aligned} n\beta_0 + \sum x_i \beta_1 &= \sum y_i \\ \sum t_i \beta_0 + \sum t_i^2 \beta_1 &= \sum t_i y_i \end{aligned}$$

Como el determinante de  $X^t X$  es distinto de cero resulta que

$$(X^t X)^{-1} = \frac{1}{n \sum (t_i - \bar{t})^2} \begin{pmatrix} \sum t_i^2 & -\sum t_i \\ -\sum t_i & n \end{pmatrix}$$

y por consiguiente, el estimador puntual de mínimos cuadrados de  $\beta$  es

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t Y = \frac{1}{n \sum (t_i - \bar{t})^2} \begin{pmatrix} \sum t_i^2 \sum y_i - \sum t_i \sum t_i y_i \\ -\sum t_i \sum y_i + n \sum t_i y_i \end{pmatrix}$$

La matriz de covarianza de  $\hat{\beta}$  es

$$Cov(\hat{\beta}) = \hat{\sigma}^2 (X^t X)^{-1}$$

en donde

$$\hat{\sigma}^2 = \sigma_{y_i}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - (\beta_1 t_i + \beta_0))^2$$

Podemos obtener resultados mejores y propiedades deseables de los estimadores. Concretamente se puede conseguir que existe independencia entre  $\hat{\beta}_0$  y  $\hat{\beta}_1$  y que sus varianzas sean lo más pequeñas posibles. Así, si se impone que  $\sum t_i = 0$ , es decir centramos todas las observaciones alrededor del tiempo medio, entonces  $Cov(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = 0$ , resultado que los estimadores son independientes. En estas condiciones resulta que

$$\begin{aligned} Var(\hat{\beta}_0) &= \frac{\hat{\sigma}^2}{n} \\ Var(\hat{\beta}_1) &= \hat{\sigma}^2 \frac{1}{\sum t_i^2} \end{aligned}$$

Así el error cometido al estimar la velocidad por el método de mínimos cuadrados viene dada por

$$\sigma_{vel} = \hat{\sigma}_{\hat{\beta}_1} = \hat{\sigma} \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n t_i^2}} \quad (6.1)$$

lo que demuestra que a mayor intervalo de tiempo mejor será la estimación de dicha velocidad.

## 6.2. Velocidad horizontal

Según el modelo anterior las velocidades cartesianas obtenidas al analizar todas las campañas y dadas para el sistema de referencia ITRF2000 vienen reflejadas en la tabla 6.1

Estación	ID	Velocidades Cartesianas		
		$V_x$ (mts/año)	$V_y$ (mts/año)	$V_z$ (mts/año)
Alicante	ALAC	-0.0077	0.0260	0.0160
Almeria	ALME	-0.0167	0.0199	0.0147
Cartagena	CART	-0.0087	0.0235	0.0144
Ceuta	CEUT	-0.0335	0.0359	0.0062
Córdoba	CORD	-0.0101	0.0219	0.0119
Granada	GRAN	-0.0203	0.0189	0.0047
Mahón	MAHO	0.0090	0.0270	0.0267
Málaga	MALA	-0.0036	0.0246	0.0197
Melilla	MELI	-0.0125	0.0206	0.0111
Segura de León	CAST	-0.0109	0.0229	0.0052
San Fernando	SFER	-0.0013	0.0189	0.0182

Tabla 6.1: Velocidades cartesianas en el sistema ITRF2000.

También se han obtenido las velocidades horizontales en coordenadas geodésicas para poder representarlas en el plano. Para ello se han transformado las coordenadas finales de cada una de las campañas en coordenadas geodésicas y, utilizando también la técnica de mínimos cuadrados se han obtenido las velocidades en las componentes Norte y Este. Un ejemplo de dicha técnica viene reflejada en las figuras 6.1 y 6.2

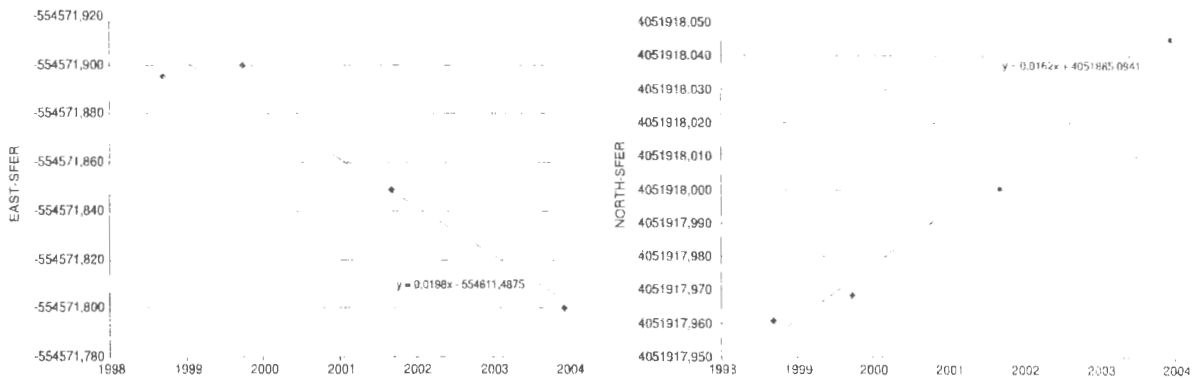


Figura 6.1: Mínimos cuadrados para la estación de San Fernando.

En la tabla 6.2 se muestran las posiciones y los valores de las velocidades geodésicas estimadas

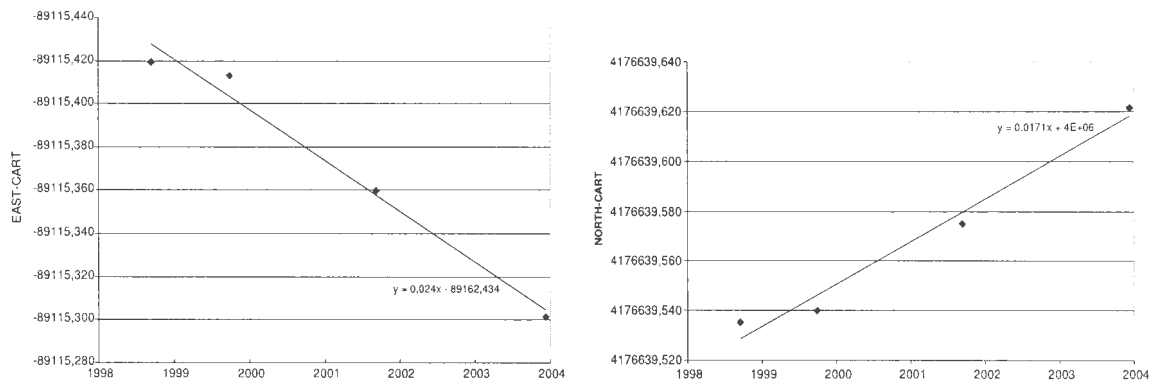


Figura 6.2: Mínimos cuadrados para la estación de Cartagena.

en el sistema ITRF2000 para cada una de las estaciones, así como el error cometido y dado por la ecuación 6.1

Estación	ID	Coordenadas(°)		Velocidades (mm/año)			
		Latitud	Longitud	$V_e$	$\sigma_{V_e}$	$V_n$	$\sigma_{V_n}$
Alicante	ALAC	38.33891	-0.48123	25.60	4.09	17.54	1.62
Almería	ALME	36.85253	-2.45944	19.50	2.09	10.60	1.03
Cartagena	CART	37.58674	-1.01204	23.51	2.35	17.05	1.87
Ceuta	CEUT	35.89605	-5.31133	22.98	6.96	19.98	4.53
Cordoba	CORD	37.84121	-4.64093	21.84	-	16.73	-
Granada	GRAN	37.19022	-3.59532	18.12	2.87	12.97	4.58
Mahón	MAHO	39.89735	4.26850	25.54	2.39	13.44	3.14
Malaga	MALA	36.72611	-4.39352	18.64	2.20	5.20	0.82
Melilla	MELI	35.28993	-2.93814	20.45	3.31	16.95	2.03
Segura de Leon	CAST	38.12272	-6.53214	22.34	-	12.47	-
San Fernando	SFER	36.46434	-6.20564	19.66	3.15	16.22	1.86

Tabla 6.2: Desplazamientos absolutos horizontales en el sistema ITRF2000.

En las estaciones de Córdoba y Segura de León no se ha obtenido ningún error en la estimación por mínimos cuadrados, puesto que dichas estaciones sólo han sido observadas en dos campañas. Para medir la precisión de dicha solución se ha utilizado el criterio de sus errores representado en su elipse de error al 95%. En el mapa 6.3 se han representado dichas velocidades con sus respectivas elipses de error.

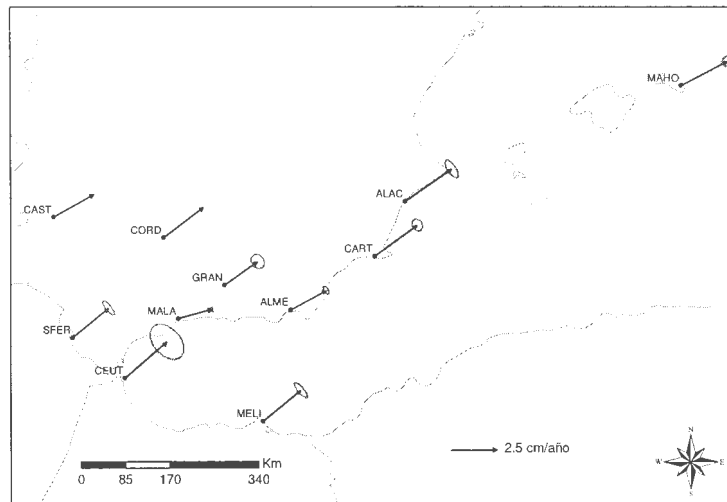


Figura 6.3: Desplazamientos absolutos horizontales en el ITRF2000 obtenidos en este trabajo con sus elipses de error.

### 6.3. Comparación con otros modelos

Una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con modelos geofísicos permite evaluar la exactitud de las soluciones. En este caso los hemos comparado con el modelo NNR-NUVEL 1A [7].

Dicho modelo describe los movimientos de las placas a través de un vector de rotación, llamado vector de Euler, de la propia placa y basado en la rotación del polo. El modelo NNR-NUVEL 1A (*No Net Rotation-Northwestern University Velocity model 1A*) [10]. Dichas velocidades angulares de las placas con relación a los ejes cartesianos vienen dadas en la tabla 6.3

Placa	ID	$\Omega_x$ (rad/My)	$\Omega_y$ (rad/My)	$\Omega_z$ (rad/My)
África	AFRC	0.000891	-0.003099	0.003922
Antarctica	ANTA	-0.000821	-0.001701	0.003706
Arabia	ARAB	0.006685	-0.000521	0.006760
Eurasia	EURA	-0.000981	-0.002395	0.003153
Pacific	PCFC	-0.001510	0.004840	-0.009970
India	INDI	0.005570	0.000040	0.005790
Australia	AUST	0.007839	0.005124	0.005282

Tabla 6.3: Velocidades angulares de las principales placas tectónicas en el modelo NNR-NUVEL 1A.

Utilizando dichas velocidades angulares podemos calcular las velocidades de cada una de las

estaciones estudiadas, según la siguiente relación [22]

$$\vec{V}_A = \Omega_{P_t} \cdot \vec{X}_A$$

donde  $\vec{V}_A$  representa el vector velocidad,  $\vec{X}_A$  las coordenadas cartesianas, ambos en el mismo sistema de referencia  $A$  y  $\Omega_{P_t}$  es una matriz antisimétrica dada por

$$\begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix}$$

donde  $\Omega_x, \Omega_y$  y  $\Omega_z$  son los valores de las velocidades angulares de la tabla 6.3.

Las velocidades obtenidas vienen reflejadas en la tabla 6.4. Sólo nos hemos centrado en las velocidades horizontales ( $V_n$  y  $V_e$ )

Estación	ID	Velocidades NNR-NUVEL 1A	
		$V_e$ (mm/año)	$V_n$ (mm/año)
Alicante	ALAC	19.57	15.31
Almería	ALME	19.45	15.51
Cartagena	CART	19.59	15.36
Ceuta	CEUT	19.12	15.77
Cordoba	CORD	18.95	15.71
Granada	GRAN	19.22	15.62
Mahón	MAHO	20.16	14.75
Malaga	MALA	19.15	15.69
Melilla	MELI	19.57	15.56
Segura de Leon	CAST	18.59	15.87
San Fernando	SFER	18.89	15.84

Tabla 6.4: Desplazamientos horizontales según el modelo NNR-NUVEL 1A.

La discrepancia de nuestros resultados con respecto a las velocidades del modelo geofísico se muestran en el gráfico 6.4

En él se pueden observar como las diferencias oscilan entre los 6 mm/año de la componente Este de Alicante y los 0,05 mm/año de la componente Este de Almería, salvo la estación de Málaga en donde se dispara dicha diferencia. Esto puede ser debido a que los modelos geofísicos no modelan bien en los bordes de las placas tectónicas, en donde los movimientos son más intensos.

Para terminar la comparación con el modelo NNR-NUVEL 1A se han representado los desplazamientos horizontales, tanto del trabajo realizado con medidas GPS como las obtenidas con dicho modelo, como se observa en el mapa 6.5.

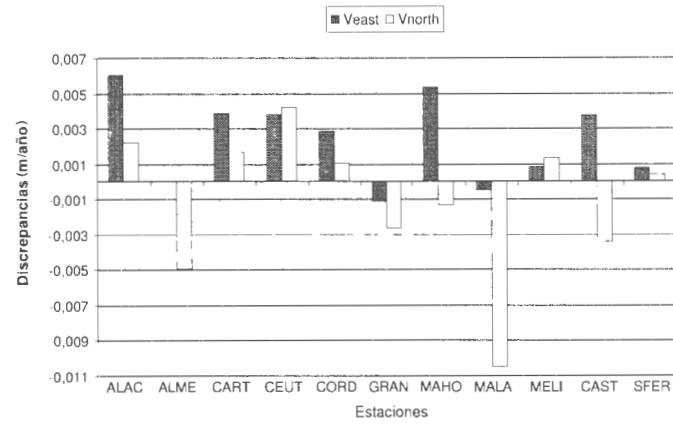


Figura 6.4: Diferencia entre las velocidades finales y el modelo NNR-NUVEL 1A.

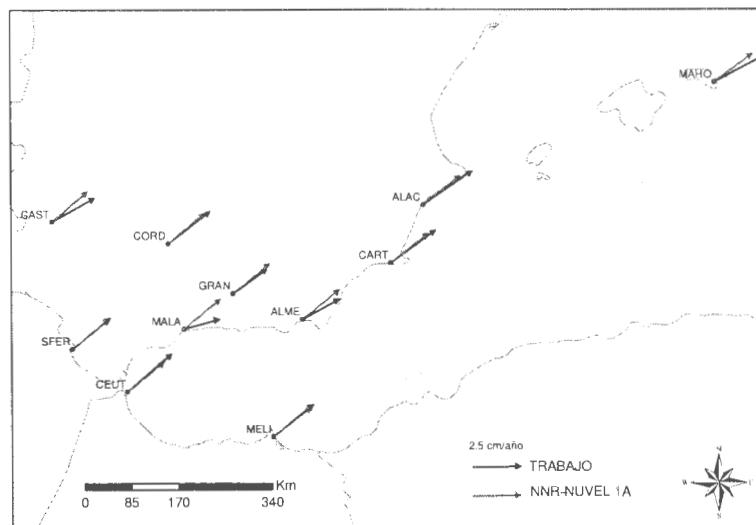


Figura 6.5: Desplazamientos horizontales obtenidos en este trabajo y comparados con el modelo NNR-NUVEL 1A.



# Bibliografía

- [1] Berrocoso, M.; Ramírez, E.; Pérez-Peña, A.; Fernández, A.; et al.: *El Sistema de Posicionamiento Global*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, Cádiz, 2004.
- [2] Berrocoso, M.: *Tratamiento estadístico de datos geodesicos procedentes de observaciones de satélites GPS*. Ed. Ministerio de Defensa, Madrid, 1996.
- [3] Berrocoso, M.; Ramírez, E.; Pérez-Peña, A.; Salamanca, J.M.; et al.: *Notas de trigonometría esférica y astronomía de posición*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, Cádiz, 2004.
- [4] Beutler, G.; Bock, H.; Hungentobler, U.; Fridez, P.; et al.: *Bernese GPS Software Version 4.2*. Ed. Astronomical Institute University of Berne, Berna, 2001.
- [5] Brockmann E.: *Combination of Solutions for Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*. Ph.D. Thesis, University of Bern (Suiza), 1996.
- [6] Cid Palacios, R.: *Geodesia: Geométrica, Física y por Satélites*. Ed. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 1997.
- [7] DeMets et al.: *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*. Geophysical Research Letters. Vol. 21, nº 20, pág. 2191-2194, 1994.
- [8] Gárate, J.: *Geodesia Espacial: GPS*. Ed. Ministerio de Defensa, Madrid, 1997.
- [9] Grevaes, M.; Fane, C.: *The British EUREF GB 2001 Campaign*, Subcommission for Europe (EUREF) Publication nº 12, in Ponta Delgada, Junio, 2002.
- [10] Hesikanen, W.A.; Moritz, H.: *Geodesia Física*. Ed. Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 1985.
- [11] Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.: *Global Positioning System: Theory and Practice*. Ed. Springer-Verlag, New York, 1992.
- [12] Leick, A.: *GPS: Satellite Surveying*. Ed. Wiley Intersciencias, New York, 1990.

- [13] Man, S.: *Investigations into the Estimation of Tropospheric Delay and Wet Refractivity Using GPS Measurements*. Ph.D. Thesis, University of Calgary (Italia), 2003.
- [14] Martín, J.; Udías, A.: *Estudio integrado por métodos GPS y sísmicos de la zona de contacto de las placas euroasiática-africana correspondiente a la región Ibero-Magrebí*. 100 años de Observaciones Sismológicas en San Fernando, pág. 167-176. Ed. Ministerio de Defensa, Madrid, 1999.
- [15] Martín, J.; Garate, J.; Pazos, A.: *Geophysical/Geodetical activities of the ROA to study the Eurasia-Africa plate boundary zone in the Ibero-Maghrebian region*. The Tenth General Assembly of the Wegener Project. Extended Abstracts Book. Ed. Ministerio de Defensa, Madrid, 2000.
- [16] Martínez, J.A.; Fuster, J.M.: *El Sistema de Posicionamiento Global*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, 1995.
- [17] Mervart, L.: *Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*. Ph.D. Thesis, University of Bern (Suiza), 1995.
- [18] Nilforoushan, F.; Masson, F.; Vernant, P.; et al.: *GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran*. Journal of Geodesy, nº 77, pág. 411-422, 2003.
- [19] Pérez, J.A.; Monico, J.F.; Chaves, J.C.: *Velocity Field estimation Using Precise Point Positioning: The South American Plate Case*. Journal of Global Positioning Systems, nº 2, pág. 90-99, 2003.
- [20] Seeber, G.: *Satellite Geodesy*. Ed. Walter de Gruyter, Berlín, 1993.
- [21] Sevilla, M.J.; Romero, P.: *Análisis estadístico de observaciones geodésicas antes de la compensación*. Física de la Tierra, nº 2, pág. 87-110, 1996.
- [22] Soler, T.: *A compendium of transformation formulas useful in GPS work*. Journal of Geodesy, nº 72, pág. 482-490, 1998.
- [23] Spijker, J. J.: *Signal structure and performance characteristics*. Global Positioning System, Vol. I, pág. 29-54, 1980.
- [24] Teunissen, P.; Kleusberg, A.: *GPS for Geodesy*. Ed. Springer-Verlag, New York, 1998.
- [25] Torge, W.: *Geodesy*. Ed. Walter de Gruyter, Berlín, 1991.
- [26] Torrecillas, C.: *Proyecto final de carrera*. Escuela Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topografía, Valencia, 1998.
- [27] Wells, D. E.; Beck, N.: *Guide to GPS Positioning*. Ed. Canadian GPS Associates, Fredericton, 1986.

## AÑO 2003

- **1/2003:** Memoria de Actividades del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando.2002
- **2/2003:** **Manuel Sanchez Francisco.**  
Rotación de la Tierra, Sistemas de Referencia.
- **3/2003:** 250 Años de Astronomía en España. 1753-2003  
Resúmenes de Comunicaciones y Carteles presentados en las Jornadas Científicas.
- **4/2003:** **Gabriel Ruiz Garzón**  
Recorrido por la Historia de la Estadística en la Biblioteca del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando.
- **5/2003:** **Ana Belén Vicente Martínez**  
Reducción Astrométrica de las placas fofográficas "Carte Du Ciel" ( Zona de San Fernando ).

## AÑO 2004

- **1/2004:** Memoria de Actividades del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando. 2003
- **2/2004:** **Antonio A. Pazos Garcia**  
Estación Sísmica Digital.Tratamiento Digital de Señales.
- **3/2004:** **Francisco Javier Galindo Mendoza**  
Desarrollo de un algoritmo para la realización de una escala nacional de Tiempo Atómico.
- **4/2004:** **14th. Internacional Laser Ranging Workshop.**
- **5/2004:** **Francisco Javier Montojo Salazar**  
Optimización de la estrategia observacional para el recubrimiento rápido del cielo por TDI.
- **6/2004:** **José Alberto Gutiérrez Fernández**  
Digitalización y medición de las placas fotograficas de la Carta del Cielo y del catálogo astrofotográfico, Zona de San Fernando.

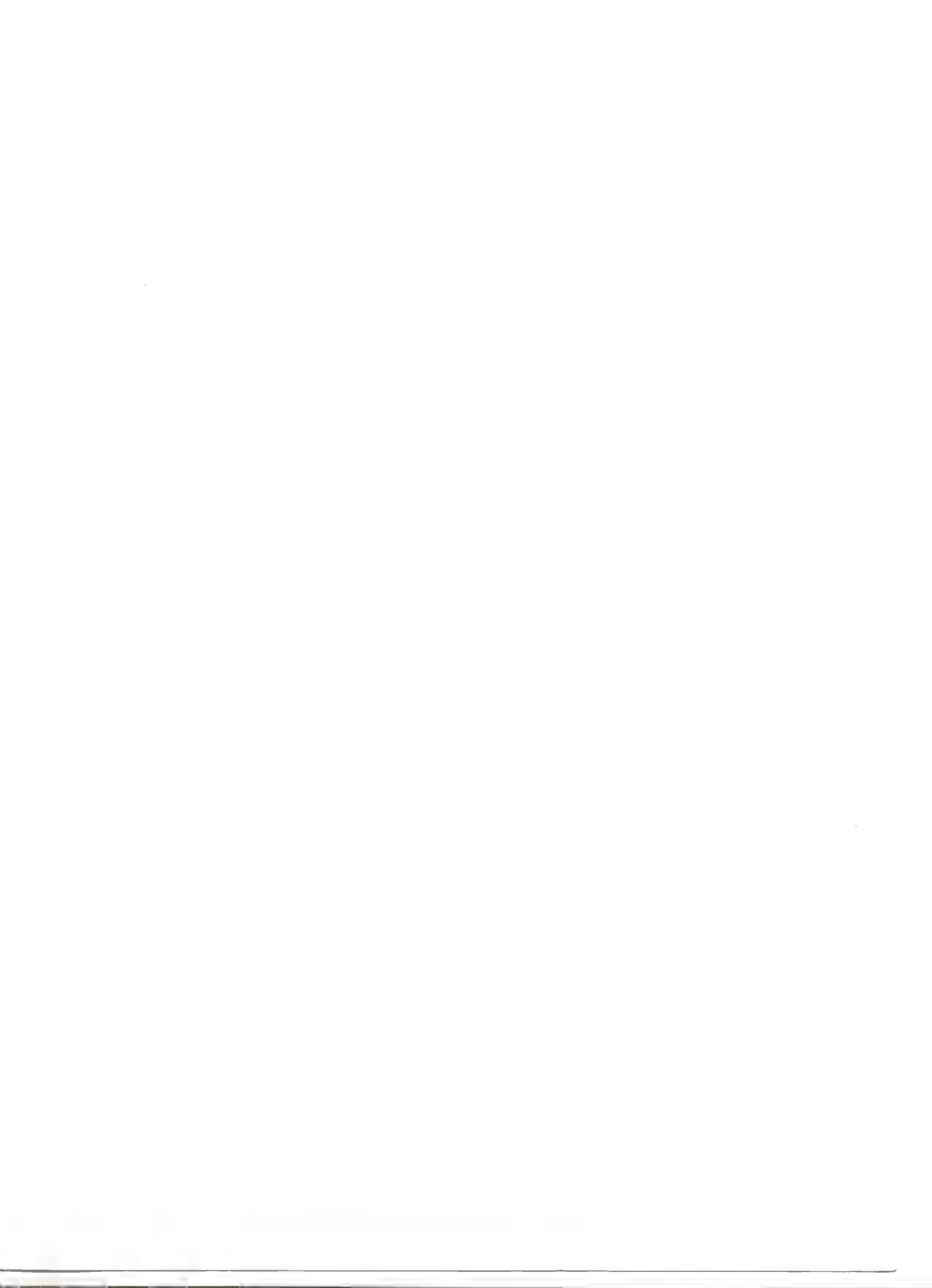


## AÑO 2005

**- 1/2005: Alejandro Pérez Peña.**

Cálculo de vectores desplazamiento en el Sur de España-Norte de África, deducidos a partir de observaciones GPS.







MINISTERIO  
DE DEFENSA

