



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ingeniería
Departamento de Agrimensura

Tesis de grado

Procesamiento diferencial estático mediante dobles diferencias de código

Desarrollo de una aplicación para Sistemas de Información Geográfica

Alumno: Demián Gómez
Padrón 81949

Director: Agrim. Alberto Pradelli
Departamento de Agrimensura

Co-Directora: Ing. María Alejandra Arecco
Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas

*A mis padres, por enseñarme el amor a las ciencias.
A Leslie, por ayudarme a encontrar el camino.*

Agradecimientos

El autor quisiera agradecer especialmente a las siguientes personas, sin las cuales no hubiera sido posible completar este trabajo:

Ing. Enrique D'Onofrio
Ing. José Luis Alvariñas
Ing. Leonard Hylke
Srta. Lorena Tripodi
Sr. Agustín Raffo
Sr. Mariano Balbarrey
Agrim. Sergio Cimbaro
Sub. Pr. TSG Horacio Barrera

Índice general

Agradecimientos	V
Índice general	VI
Resumen	IX
Introducción	XI
1 Utilización de Sistemas de Posicionamiento Global	1
1.1. Fundamentos de los sistemas de posicionamiento global	2
1.2. Sistema de coordenadas de referencia	3
1.3. Señales y frecuencias del sistema GPS	3
1.4. Obtención de coordenadas en base a pseudodistancias	5
2 Ecuaciones de posicionamiento	9
2.1. Ecuación de observación	10
2.2. Resolución clásica de la intersección inversa en el espacio	11
2.3. Algoritmo de Bancroft	12
2.4. Posicionamiento diferencial	15
3 Modelos estocásticos	19
3.1. Proceso aleatorio	20
3.2. Selección del modelo estocástico adecuado	21
3.3. Test de bondad de ajuste	22
3.4. Modelos estocásticos propuestos	23
3.5. Breve comentario sobre correlación de observaciones	25
4 Aplicación de dobles diferencias	27
4.1. Ecuaciones del modelo determinístico	27
4.2. Algoritmos para procesamiento de vectores	29
5 Resultados y análisis	37
5.1. Descripción de la micro red geodésica	37
5.2. Metodología utilizada	39
5.3. Remedición de la micro red geodésica	40
5.4. Comprobación del modelo estocástico	41
5.5. Contrastación de los algoritmos desarrollados	42
6 Conclusiones y recomendaciones	71
6.1. Dependencia del receptor: reloj interno	71

6.2. Multipath	73
6.3. Metodología de observación	73
6.4. Aplicación del software a SIG	75
A Información general	77
A.1. Receptores utilizados	77
A.2. Información sobre las estaciones permanentes RAMSAC	101
A.3. Generación de RINEX a partir de protocolos propietarios	108
B Utilización de la aplicación desarrollada	111
B.1. Visualización rápida de los resultados	114
B.2. Exportación de resultados	115
B.3. Utilización de las clases desarrolladas en VB.NET	116
Referencias	117

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla una aplicación para el procesamiento de vectores GPS (*Global Positioning System*) observando únicamente el código C/A (Coarse Acquisition), utilizando el entorno de programación Framework.NET. Para el desarrollo de la misma, es necesario estudiar los errores involucrados en una observación GPS así como también las técnicas de resolución de las ecuaciones de observación necesarias para la obtención por mínimos cuadrados de la posición de la estación desconocida, respecto de la base.

Para la reducción de la influencia de los errores antes mencionados, se utiliza la técnica diferencial, obteniéndose simples y dobles diferencias entre dos estaciones GPS observando satélites al mismo tiempo. Como alternativa a la obtención de coordenadas GPS autónomas aproximadas, se utiliza el algoritmo de Bancroft para la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales.

Durante el desarrollo de la presente aplicación, se elaboraran algoritmos de procesamiento de vectores, así como también alternativas para el filtrado de observaciones con errores superiores a los deseables, para obtención de coordenadas submétricas. Como consecuencia de esto último, se obtiene también una metodología de observación aplicable a mediciones únicamente en código C/A.

Por último, se evalúan los resultados de las mediciones realizadas en la microrred geodésica de la Facultad de Ingeniería, sede Las Heras, con receptores geodésicos. Dichas mediciones son procesadas utilizando el observable de fase para luego -descartando las observaciones de fase- comparar las coordenadas geodésicas con los resultados del algoritmo obtenido durante el desarrollo de la aplicación.

Los vectores son también observados utilizando receptores de bajo costo (*GlobalSAT* modelo ET-332, *Trimble* modelo ACEII). Esto permite evaluar el rendimiento y la precisión esperada en función del tiempo de observación, de manera de aceptar o descartar posibles levantamientos a escalas medias para aplicaciones de sistemas de información geográfica.

Introducción

La tecnología de sistemas de posicionamiento global (GPS) está cada vez más presente en diversos ámbitos, excediendo sus aplicaciones iniciales dentro del campo de la geodesia y la navegación. Avances en la industria hacen posible que estos instrumentos se encuentren en la actualidad vinculados a diversas aplicaciones, entre las que se encuentran el control y rastreo de de cargamentos, la transferencia de sincronismo en los sistemas de telecomunicaciones, etc. Para el caso de levantamientos topográficos expeditivos, existen diversas soluciones orientadas a la generación de datos para sistemas de información geográfica (SIG).

En el mercado existe una variedad muy grande de receptores GPS y software para post-proceso. En cuanto a receptores, los denominados geodésicos permiten alcanzar precisiones por debajo del centímetro, utilizando el software de post-proceso adecuado o la técnica diferencial denominada *real time kinematic* (RTK). Por otra parte, los receptores más comunes denominados navegadores, permiten al usuario posicionarse en el entorno de los 5 metros sin utilizar ninguna aplicación de post-proceso ni técnica diferencial alguna.

Entre el centímetro y los 5 metros de precisión, se encuentran las soluciones denominadas submétricas que permiten lograr precisiones de 1 metro o mejores. Dicho conjunto de software y equipamiento es más económico que un equipo de simple o doble frecuencia geodésico, rondando los 5000 dólares estadounidenses. Sin embargo, este importe no es lo suficientemente accesible para justificar su compra en el ámbito universitario.

Fue por ello que durante el curso de geodesia II, y motivado por la curiosidad, el autor de este trabajo decidió adquirir un receptor (con un costo aproximado de 50 dólares) que registra código C/A y reporta pseudodistancias a través de un puerto serie RS232C. La pregunta clave era si sería posible llegar a las precisiones antes descritas utilizando algún software de postproceso disponible en Internet de forma legal y gratuita.

Luego de algunas semanas de investigación, se intentaron varias alternativas de software. Para los casos en los que fue posible ingresar dos archivos RINEX –cabe aclarar que no todas las aplicaciones permiten la carga de dos archivos en este formato– no se explicitaba el método de cálculo utilizado o directamente se aplicaba la técnica denominada DGPS para obtener una coordenada “corregida”. Dicha técnica, aunque útil, no permite estimar en forma matemática la precisión alcanzada, más allá de la experiencia que dicta la práctica. Esta experiencia revela que el método permite obtener coordenadas en el orden del metro de precisión.

Por esta razón, se comenzó a trabajar en un algoritmo que permitiera procesar en forma diferencial, haciendo simples y dobles diferencias. Este algoritmo fue realizado utilizando planillas de cálculo de *Microsoft Excel*. Los resultados obtenidos estuvieron en aquella oportunidad dentro de los 50 cm, por lo que el algoritmo parecía prometedor.

Al momento de plantearse este trabajo de tesis, el objetivo ya estaba claro: la meta no sería demostrar que el método funciona, sino comprobar que los algoritmos desarrollados permitirían obtener resultados satisfactorios. Al mismo tiempo, otro objetivo sería desarrollar una herramienta **gratuita** y de fácil acceso que le permitiera a otros estudiantes de la carrera de ingeniería en agrimensura –u otras carreras– procesar vectores GPS observados utilizando equipamiento de muy bajo costo.

Luego de decenas de mediciones y de muchas pruebas, se descubrió que el método entrega resultados muy aceptables, concluyéndose que existía una dependencia muy fuerte del tipo de receptor utilizado. Esto último hace referencia a la estabilidad del reloj de cada receptor. Esto no resulta tan evidente, puesto que la técnica de dobles diferencia teóricamente elimina los errores del reloj de los receptores. En los casos en los cuales se realizaron pruebas con receptores geodésicos, descartando la observación de fase, los resultados estuvieron dentro de los 15 cm para 2 horas de observación.

Estas precisiones alcanzadas son de especial interés a la hora de brindar apoyo a los sistemas de información geográfica. Una parte fundamental de la aplicación desarrollada es el manejo y procesamiento de levantamientos en modo cinemático. Dicha técnica no fue contemplada para el presente trabajo, dado que un levantamiento cinemático implica muchas más etapas dentro del algoritmo propuesto. Entre ellas, pueden mencionarse filtros de Kalman y otras. Esta parte de la aplicación quedará como tarea pendiente para un futuro desarrollo por parte de alumnos que sigan estos pasos durante la elaboración de sus trabajos de tesis de final de carrera.

Objetivos generales

Los objetivos generales del presente trabajo se vieron motivados debido a que la técnica aquí descrita no se encuentra ampliamente desarrollada en el ámbito académico. Esto se debe fundamentalmente a que esta solución presenta inferioridad de precisión frente al método de post-proceso conocido como resolución del número inicial de ambigüedades (para observable de fase).

El descubrimiento por parte del autor de diversas aplicaciones concretas que requerían de un posicionamiento diferencial de menor precisión, y a bajo costo, fueron también impulsoras de los objetivos abajo detallados.

- Desarrollar un procedimiento estándar para realizar una observación utilizando observable de código.
- Crear un programa y los algoritmos necesarios para lograr resultados en el posicionamiento diferencial en forma rápida y precisa utilizando recursos de fácil acceso.
- Realizar una librería compuesta por 4 clases en VB.Net (2010) a partir de los sistemas de ecuaciones de posicionamiento.
- Armar un equipo receptor de bajo costo que registre código C/A para ser utilizado por el programa desarrollado.
- Validación de los resultados obtenidos con un receptor comercial.

Para cumplir con estos objetivos, se ha dividido el presente en 6 capítulos y 2 anexos. En los 3 primeros se brindan los fundamentos teóricos para el desarrollo de la aplicación propuesta. El cuarto, contiene la información referente a la construcción de las matrices de cálculo y estructuración de los algoritmos que conformarán finalmente el programa desarrollado. El capítulo 5 presenta las validaciones de los algoritmos utilizando receptores comerciales y, en algunos casos, receptores armados por el autor. El capítulo 6 expone conclusiones y recomendaciones así como también un procedimiento a seguir para realizar observaciones utilizando observable de código.

Capítulo 1

Utilización de Sistemas de Posicionamiento Global para mediciones estáticas

Durante las últimas dos décadas, la utilización de la tecnología GPS para navegación y obtención de coordenadas ha aumentado en forma considerable, así como también las aplicaciones para las diversas ramas de la ingeniería, entretenimiento, aviación, navegación marítima y otras más específicas.

Pensado originalmente como un sistema para uso militar, GPS continúa siendo hoy en día una herramienta de defensa, pero su utilización civil es cada vez más generalizada. En estos últimos años, cualquier automovilista puede disfrutar de una conducción más segura y relajada utilizando un receptor tan pequeño, que puede guardarse en un bolsillo. Estos receptores GPS pueden ubicar al usuario con una precisión muy aceptable –siempre que se cuente con la cartografía adecuada– y guiarlo a destino sin mayores inconvenientes.

La posibilidad de este tipo de navegación existe fundamentalmente por dos factores; el primero podría decirse que es de origen electrónico. El desarrollo de microprocesadores e interfaces de usuario atractivas y fáciles de utilizar, así como también relojes de cuarzo cada vez más estables, junto con la reducción de costos en la producción de éstos, hacen posible la fabricación de equipos de navegación muy económicos y precisos. Otro factor muy importante es la eliminación, a partir de la medianoche del 1 de mayo del año 2000, de la denominada Disponibilidad Selectiva¹.

En Argentina, en el campo de la agrimensura, el sistema GPS se utiliza en forma permanente desde comienzos de la década del '90, aunque es solamente en los últimos 10 años que su utilización se ha difundido en forma masiva. Hoy por hoy es una herramienta indispensable para la georreferenciación de parcelas rurales. Esto se debe en parte a que una medición GPS diferencial permite determinar vectores espaciales de muy largas longitudes con apenas centímetros e incluso milímetros de incertidumbre. Esto lo convierte en un sistema ideal para levantamientos topográficos o para la confección de redes de apoyo geodésicas, ya que le per-

¹Disponibilidad Selectiva: traducción del término en inglés *Selective Availability*. Esta característica estaba compuesta de lo que se denomina “falsificación del reloj de satélite” (*SA-dither*) y “falsificación de efemérides de satélites” (*SA-epsilon*). El objetivo era producir a un usuario civil un error de 100 metros o más en su posición. (Leick, 1993)

mite a los profesionales de la agrimensura resolver múltiples problemas que en épocas pasadas requerían de complicadas y problemáticas mediciones, que en ciertas condiciones, no lograban alcanzar la precisión que se logra actualmente utilizando los sistemas de posicionamiento global.

1.1. Fundamentos de los sistemas de posicionamiento global

El sistema de posicionamiento global más popular es sin lugar a dudas GPS. Sus siglas provienen del inglés y significan *Global Positioning System*. Sin embargo, este no es el único sistema de posicionamiento que existe en la actualidad. La versión rusa de dicho sistema se conoce como GLONASS, y GALILEO al homólogo lanzado por la Unión Europea.

El sistema de posicionamiento global GPS, consta de tres segmentos: espacial, control y usuario (Navstar, 1996). El siguiente resumen tiene por objetivo dar al lector una breve introducción a estos temas. Para obtener la información completa, debería consultarse bibliografía especializada, que figura dentro de las referencias de este trabajo.

1.1.1. Segmento espacial

El segmento espacial está compuesto por la constelación de satélites, los cuales orbitan alrededor de la tierra. El sistema está diseñado de modo tal que al menos cuatro satélites estén visibles al mismo tiempo en cualquier posición de la superficie terrestre, en cualquier momento del día.

La altitud de las órbitas de la constelación es aproximadamente de 20200 km con 6 planos orbitales. Los períodos de los satélites son de 12 horas sidéreas. (Bielenki, 2008)

1.1.2. Segmento de control

El segmento de control está compuesto por estaciones terrenas que controlan las órbitas de los satélites realizando ocasionales maniobras de ajuste. Existen diversas estaciones con esta denominación, pero es solamente una la encargada de realizar el envío de los datos actualizados sobre efemérides de los satélites (mensaje de navegación)².

1.1.3. Segmento de usuarios

Este segmento abarca a todos los receptores que reciben la señal GPS, en cualquiera de sus frecuencias. Estos usuarios pueden dividirse en dos grandes grupos: usuarios militares y civiles (Bielenki, 2008).

En el grupo compuesto por los usuarios civiles es donde se encuentra la mayor diversidad de productos disponibles para diferentes actividades. Entre estas figuran la navegación personal para actividades deportivas, posicionamiento terrestre autónomo, posicionamiento terrestre diferencial y otras. La noción de posicionamiento autónomo hace referencia a la utilización de un solo receptor GPS para obtención de coordenadas en tiempo real. En el posicionamiento terrestre diferencial, se utilizan dos equipos que pueden entregar coordenadas en tiempo real o por medio de post-procesos. Durante los próximos capítulos se tratará más en profundidad esta alternativa.

²La información completa sobre el mensaje de navegación, estructura, parámetros orbitales y otras características puede encontrarse en el Apéndice II del documento IS-GPS-200 Revisión E, 2010 p. 67. Ver también la sección 1.3.2 p. 4

1.2. Sistema de coordenadas de referencia

Todo sistema de posicionamiento requiere de un sistema de referencia sobre el cual se obtendrán algún tipo de coordenadas. En relevamientos topográficos tradicionales, la estación total o teodolito utiliza un sistema polar sobre el cual se miden ángulos respecto de una dirección de referencia y distancias al detalle de interés. Estas coordenadas polares son posteriormente transformadas (por la estación total o por el operador del teodolito) a coordenadas rectangulares en un sistema local de trabajo.

Para los sistemas de posicionamiento global, se utilizan sistemas cartesianos ortogonales con su origen en el centro de la tierra o geocentro, uno de sus ejes coincidente con el eje de rotación terrestre (Z) y otro coincidente con la intersección del ecuador con el meridiano de Greenwich (X). El tercer eje se posiciona perpendicular a los otros 2 (Y) formando una terna derecha.

Sobre este sistema pueden calcularse las coordenadas de los satélites y receptores para obtenerse la conocida terna X, Y, Z. No obstante, la presentación de coordenadas rectangulares no es habitual para representar una posición sobre la superficie terrestre. Es por eso que las coordenadas X, Y, Z son transformadas a coordenadas más conocidas como son las de latitud (ϕ), longitud (λ) y altura elipsoidal (h). Esto se logra asociando a dicho sistema de coordenadas rectangular lo que se denomina “elipsoide de referencia”. Dicho elipsoide es la figura matemática de revolución que mejor representa a la superficie terrestre.

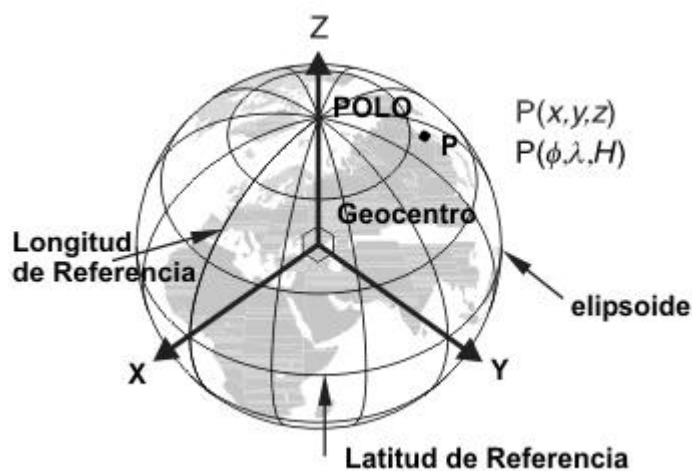


Figura 1.1: Representación del sistema cartesiano ortogonal y el elipsoide de referencia. Imagen obtenida de la Universidad Nacional de Colombia: <http://www.unal.edu.co/siamac/sig/geoide.html>

El detalle de cómo se logra esta transformación se verá en capítulos posteriores de este trabajo.

1.3. Señales y frecuencias del sistema GPS

Se conoce como interfaz entre el segmento espacial y el segmento usuario a las señales de Radio Frecuencia (RF) (Government y Navstar, 2006). Estos vínculos o interfaces entre ambos segmentos son las señales en banda L1 (1.57542 GHz) y L2 (1.2276 GHz) a las que en la

actualidad, se les ha agregado –en algunos satélites de última generación– la señal de banda L5 de 1.17645 GHz. Las diferentes frecuencias cumplen el objetivo de permitir la reducción o eliminación de ciertos errores sistemáticos mediante la utilización de combinaciones de observables entre dichas señales. Además, sobre cada frecuencia se modulan diferentes códigos como se verá más adelante.

Estas señales RF son solamente transmitidas en forma unidireccional, lo cual implica que los receptores GPS solamente reciben señales de los satélites (Seeber, 1993). Esto garantiza una cantidad infinita de usuarios, ya que los sistemas montados sobre los satélites no deben procesar ninguna información proveniente de los usuarios.

Dado que a la fecha de hoy la constelación consta de 31 satélites en órbita³, es necesario un método de transmisión de datos diferenciado para evitar que las señales de los propios satélites se interfieran entre sí, dado que todos transmiten sobre la misma frecuencia. Esta técnica es conocida como CDMA (*Code Division Multiple Access*) (Seeber, 1993) y permite a los usuarios, mediante códigos de generación de ruido pseudo-aleatorio, identificar los paquetes de información provenientes de cada satélite particular.

Estos códigos pseudo-aleatorios son una combinación de ceros y unos que parecen a primera vista **ruido aleatorio** (Seeber, 1993) (en inglés *pseudorandom noise* o códigos PRN). Sin embargo tienen un origen bien conocido y es posible decodificar y separar la información proveniente de cada satélite.

1.3.1. Códigos pseudoaleatorios

Existen dos códigos PRN, uno conocido como código P o de precisión y otro llamado C/A por sus siglas del inglés (*Coarse Acquisition*). El código P tiene una frecuencia fundamental de 10.23 *Mhz* mientras que en el código C/A la frecuencia es de 1.023 *Mhz* (Seeber, 1993). Dichos códigos son una sucesión de ceros y unos modulados en sus correspondientes señales (L1 y/o L2).

Para cada uno de estos códigos, es posible calcular la “longitud de onda” asociada. La utilización del término longitud de onda hace referencia al equivalente en distancia de un uno o un cero del código C/A. Dado que en el presente trabajo el objetivo es trabajar únicamente con dicho código, se ha calculado esta longitud únicamente para este mismo. Como se ha mencionado antes, la frecuencia del código C/A es 1.023 *Mhz* o $1023 \cdot 10^3 \text{ Hz}$. Recordando que el período es la inversa de la frecuencia, entonces $T = 1/f = 1s/1023 \cdot 10^3 = 977.5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$. Habitualmente, se suele redondear este valor a 1000 *ns*. Como el medio de transmisión es la portadora L1, y su velocidad es la de la luz ($2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) (Government y Navstar, 2006), la longitud de onda puede calcularse como $\lambda = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 977.5 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 293 \text{ m}$. Estos valores se utilizarán posteriormente para arribar a algunas conclusiones sobre las vacilaciones al realizar observaciones del código C/A.

1.3.2. Mensaje de Navegación

El mensaje de navegación es transmitido mediante modulación de 50 bits por segundo, tanto sobre L1 como sobre L2. En él, se incluye toda la información relacionada al segmento

³Información extraída del sitio oficial de GPS <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>

espacial como parámetros orbitales, estado de los satélites o SV⁴, etc. Es importante mencionar que este mensaje es idéntico para todos los SVs. A continuación se detallan los parámetros transmitidos en el mensaje de navegación relacionados a las efemérides de los satélites:

Símbolo	Descripción	Unidad
Parámetros de tiempo		
t_{0e}	Tiempo de referencia (efemérides)	s
t_{0c}	Tiempo de referencia (relojes)	s
a_1, a_2, a_3	Coefficientes polinomiales de corrección de relojes	$s, s/s, s/s^2$
IODC	Identificador numérico arbitrario de reloj (<i>Issue of Data</i>)	
Parámetros Keplerianos		
\sqrt{A}	Raíz cuadrada del semieje mayor	$m^{1/2}$
e	Excentricidad	
i_0	Ángulo de inclinación al tiempo de referencia	rad
Ω_0	Longitud del nodo ascendente al tiempo de referencia	rad
ω	Argumento del perigeo	rad
\overline{M}_0	Anomalía media al tiempo de referencia	rad
IODE	Identificador numérico arbitrario de efemérides (<i>Issue of Data</i>)	
Parámetros de perturbaciones		
Δn	Desplazamiento medio respecto del parámetro calculado	rad/s
$\dot{\Omega}$	Pendiente de cambio en ascensión recta	rad/s
\dot{i}	Pendiente de cambio en inclinación	rad/s
C_{us}	Corrección al argumento de la latitud (amplitud del seno)	rad
C_{uc}	Corrección al argumento de la latitud (amplitud del coseno)	rad
C_{is}	Corrección al argumento de la inclinación (amplitud del seno)	rad
C_{ic}	Corrección al argumento de la inclinación (amplitud del coseno)	rad
C_{rs}	Corrección al radio de la órbita (amplitud del seno)	m
C_{rc}	Corrección al radio de la órbita (amplitud del coseno)	m

Cuadro 1.1: Parámetros presentes en el mensaje de navegación. Cuadro traducido por el autor. Extraído del libro de Seeber (1993)

1.4. Obtención de coordenadas en base a pseudodistancias

Como ya se ha visto hasta aquí, un GPS es básicamente un receptor de radio. Este receptor puede –mediante un dispositivo llamado correlador y algoritmos asociados– diferenciar la señal proveniente de cada satélite a la vista. Como las coordenadas de los satélites son conocidas y pueden ser calculadas a partir de los parámetros obtenidos del mensaje de navegación, el vector geocéntrico al receptor puede ser calculado conociendo las **distancias a los satélites**.

He aquí uno de los principales problemas que los sistemas de navegación han resuelto. El mismo consiste en conocer dichas distancias sin la necesidad de tener que transmitir una señal

⁴En inglés se suele llamar a los satélites GPS *Space Vehicles*. Siguiendo la convención generalizada, la palabra satélite se abrevia usualmente SV.

al satélite, para luego de recibir un eco, calcular una pseudodistancia⁵ en base al tiempo de viaje de la señal emitida. Este es el principio fundamental en base al cual funcionan la mayoría de los distanciómetros electrónicos. En el caso del sistema GPS, los receptores no envían señal alguna, siendo los satélites en órbita los que transmiten los códigos C/A correspondientes, estando los mismos sincronizados al llamado *tiempo del sistema*.

Suponiendo que se tiene un receptor GPS que está perfectamente sincronizado al tiempo del sistema, sería posible reproducir perfectamente las señales emitidas por cada satélite. Comparando la diferencia de fase entre las señales que arriban de los satélites y las reproducidas por el receptor, es posible medir el tiempo que le ha tomado a la señal de un satélite determinado llegar al receptor. En base a estos tiempos pueden inmediatamente calcularse las pseudodistancias utilizando la velocidad de la luz. Suponiendo esta perfecta sincronización de tiempo, para hallar las 3 coordenadas del receptor (X, Y, Z) en el sistema cartesiano geocéntrico, deberían observarse al menos 3 satélites.

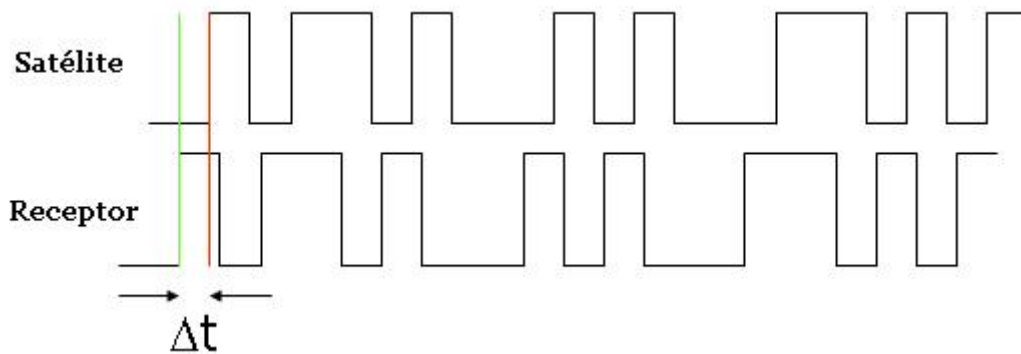


Figura 1.2: Diferencia de fase medida entre el código C/A recibido del satélite y el replicado por el receptor.

Sin embargo, dado que en primera instancia, la supuesta sincronización entre receptor y sistema GPS no es posible de alcanzar, existe por lo tanto una nueva variable que debe resolverse: el tiempo. Un receptor recién encendido puede sincronizar su reloj interno de forma aproximada utilizando el mensaje de navegación que llega modulado en la portadora. Luego de ello, comienza la replicación del código C/A. Esto permitirá obtener las diferencias de tiempo para cada satélite que habilitarán el cálculo de las correspondientes pseudodistancias. No obstante todas estas diferencias de tiempo medidas tendrán un “exceso” constante que equivale a la diferencia de tiempo debido al error de sincronización. Si se plantea una ecuación de observación para un satélite s desde un receptor r , despreciando por cuestiones de simplicidad los errores troposféricos, ionosféricos y del reloj del satélite, según Leick (1993), la misma tendrá la forma:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} + \Delta b \cdot c \quad (1.1)$$

Siendo ρ_r^s la pseudodistancia observada desde el receptor r al satélite s y c la velocidad de la luz. Δb corresponde al error de sincronización del tiempo del receptor.

⁵Se habla de pseudodistancia cuando una longitud es calculada en base a observaciones de tiempo. Esto implica que una pseudodistancia está compuesta por la distancia geométrica más un cierto valor introducido por ciertos errores, entre los que figura el de falta de sincronismo de tiempo.

En la ecuación (1.1), las variables X^s , Y^s , Z^s corresponden a la posición del centro de fase de la antena del satélite s en un instante determinado. Dicha posición puede ser calculada en base al mensaje de navegación como se mencionó anteriormente. Por consiguiente, para calcular X_r , Y_r , Z_r y Δb deberán observarse al menos 4 satélites de manera de poder resolver el sistema de ecuaciones. Este tema será tratado más en profundidad durante el siguiente capítulo.

Capítulo 2

Ecuaciones de posicionamiento

Como se ha visto durante el primer capítulo, es posible obtener las coordenadas del receptor en base a las observaciones de pseudodistancias. Antes de pisar el terreno de las ecuaciones de posicionamiento y sus diferentes métodos de resolución, es necesario hacer algunas aclaraciones con respecto a los métodos de medición de dichas pseudodistancias, los cuales ya fueron brevemente introducidos durante el capítulo anterior. Para ello, se definirán algunos conceptos sobre marcos de tiempo, necesarios para cualquier medición GPS.

Un reloj es un instrumento que permite medir el paso del tiempo. Generalmente se tiene el concepto que un reloj es un dispositivo que **acumula** tiempo y muestra dicho valor al usuario. No obstante, existen relojes que no acumulan y simplemente emiten alguna señal que puede luego utilizarse para cualquier otro fin. Estos relojes se llaman osciladores y la señal emitida corresponde a alguna variación de tensión en su salida que responde a una frecuencia sobre la cual está implícita la medición de tiempo. Por ejemplo, un oscilador o reloj de cuarzo, puede generar una onda sinusoidal de 10 Mhz que podría servir –contador de por medio– para materializar un cronómetro. Dicho cronómetro aumentaría 1 unidad su registro interno de segundos, pasadas 10 millones de oscilaciones producidas por el reloj de cuarzo.

Durante la introducción al sistema GPS, ya se ha hablado de reloj del receptor y reloj de satélite. Como ya habrá podido suponer el lector, dado que las pseudodistancias se calculan en base a mediciones de tiempo, la precisión de las mismas estará directamente ligada a la precisión con la que puedan determinarse los tiempos de viaje de la señal GPS. No obstante, si la señal emitida por los satélites es inestable, el esfuerzo por intentar determinar con precisión el tiempo de viaje de la misma será en vano.

Es por esta razón que los satélites en órbita deben garantizar que la señal emitida sea lo suficientemente estable como para que un receptor en tierra pueda determinar, con la mejor precisión que le sea posible, el tiempo de viaje. Es por esto que los satélites llevan a bordo relojes de Cesio 133 de muy alta estabilidad, que son capaces de mantener una estabilidad en su frecuencia de 10^{-13} partes por día (Leick, 1993). Debido a cuestiones económicas y de tamaño, un receptor de mano solamente puede albergar un reloj de cuarzo convencional. Durante el desarrollo del próximo capítulo sobre modelos estocásticos, se verán más en profundidad las influencias de los errores relacionados a los relojes del receptor.

La sincronización del reloj del receptor con el tiempo GPS mantenido a bordo de los satélites, permite al receptor el cálculo de las pseudodistancias. Mediante las mismas es posible calcular la posición del usuario a través de lo que se denomina ecuaciones de posicionamiento.

Cada observación de un satélite diferente plantea una nueva ecuación que finalmente dará lugar a un sistema. Durante este capítulo, se detallarán los términos y métodos para la solución de dichos sistemas.

2.1. Ecuación de observación

Definiendo que existen dos marcos de tiempo, uno mantenido a bordo del satélite GPS y otro en el receptor en tierra, utilizando la notación empleada por Xu (2003), sea t_r el tiempo nominal del receptor r en el instante de recepción de una señal, y t_s el tiempo nominal del satélite s en el instante de transmisión de la misma señal.

Luego, sea una medición de pseudodistancia entre el receptor r y el satélite s denominada P_r^s según la siguiente expresión (Leick, 1993):

$$P_r^s = (t_r - t^s)c \quad (2.1)$$

Donde c representa la velocidad de la luz. El valor $t_r - t^s$ es obtenido por medio del correlador interno del receptor. Dado que el tiempo interno del receptor t_r es conocido, el tiempo de transmisión t^s puede ser calculado en base a la pseudodistancia. Conceptualmente hablando, medir la pseudodistancia y el tiempo de recepción de la señal es lo mismo que medir el tiempo de emisión de la señal en el marco de tiempo del sistema GPS.

La ecuación (2.1) representaría la distancia geométrica si el medio de propagación fuera el vacío y si no hubieran errores en los relojes del satélite y receptor. Teniéndolos en cuenta, la pseudodistancia entre el satélite s y el receptor r será (Xu, 2003):

$$P_r^s = (t_r - t^s)c + (\delta t_r - \delta t^s)c \quad (2.2)$$

El término δt_r es el error del reloj del receptor y δt^s el error del reloj del satélite. Los signos de los errores responden a que el error del reloj del receptor hará que la medición de tiempo sea siempre superior a la real. El valor de δt^s puede ser calculado utilizando los coeficientes a_1, a_2, a_3^1 transmitidos en el mensaje de navegación. P_r^s representa el valor observado.

Como la pseudodistancia tiene en principio 2 componentes, una relacionada con la distancia geométrica entre satélite y receptor y otra con los retardos de propagación ionosférica y troposférica, la componente geométrica está dada por la siguiente expresión:

$$R_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} \quad (2.3)$$

Luego, considerando los errores de retardo ionosférico y troposférico:

$$\rho_r^s = R_r^s + \delta t_{iono}c + \delta t_{tropo}c + \epsilon_p \quad (2.4)$$

Por lo tanto:

¹Ver sección 1.3.2

$$(t_r - t^s)c = \rho_r^s \quad (2.5)$$

Los coeficientes δt_{iono} y δt_{tropo} corresponden a los valores de retardo de la señal introducidos por la ionósfera y la tropósfera, mientras que el coeficiente ϵ_p representa la suma de otros errores².

Por último, dado que $\rho_r^s = (t_r - t^s)c$, reemplazando (2.4) en (2.2) la expresión de una observación a un satélite queda de la siguiente forma:

$$P_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} + \delta t_{iono}c + \delta t_{tropo}c + \epsilon_p + (\delta t_r - \delta t^s)c \quad (2.6)$$

Donde X_r, Y_r, Z_r son las coordenadas del receptor (incógnitas), X^s, Y^s, Z^s son las coordenadas del satélite (datos) y $\delta t_{iono}, \delta t_{tropo}$ y ϵ_p valores a estimarse según algún modelo. Por último, el valor de δt_r deberá considerarse como una incógnita más dentro de la solución del sistema de ecuaciones de navegación.

La forma de calcular la posición del satélite en el instante de transmisión requiere de algunos comentarios. Dado que el tiempo de emisión de la señal no es conocido en forma precisa, ya que como se vio anteriormente el mismo puede ser estimado en base a las pseudodistancias, dicho tiempo puede ser calculado pero en forma aproximada. Si se observa con atención, suponiendo que todos los errores relacionados a la pseudodistancia sumen 300 m, tal como estima Leick (1993), dividiendo por la velocidad de la luz se obtiene un valor de tiempo de apenas 1 μs . Esta estimación produce un error de apenas unos pocos milímetros en la distancia satélite-receptor, considerando que la velocidad de cambio de la pseudodistancia es aproximadamente de 800 m/s (Leick, 1993).

Otros cálculos iterativos deben realizarse para contemplar la rotación terrestre luego de partida la señal desde el satélite. Deberá tenerse en cuenta que la velocidad de rotación es diferente según la latitud, por lo que deberá realizarse el mencionado proceso iterativo para calcularla. Esto se verá con mayor detalle durante la siguiente sección.

2.2. Resolución clásica de la intersección inversa en el espacio

Obtener una posición de un receptor GPS sobre el marco de referencia podría asimilarse a un problema de trilateración, en el que se observan 3 distancias a puntos fijos con coordenadas conocidas. Observando la ecuación (2.6), y descartando todos los términos fuera de la raíz cuadrada, la misma podría utilizarse para obtener la coordenada de una estación total desde la que se han observado 3 o más distancias a puntos fijos diferentes.

Sin embargo, como ya se ha visto, la ecuación incluye el error de sincronización del reloj del receptor así como también algunos otros términos que deberán estimarse. Nótese que la ecuación de observación no es lineal, por lo que los valores de la terna X_r, Y_r, Z_r no podrán despejarse directamente utilizando algoritmos convencionales. Dicha ecuación deberá ser linealizada utilizando el teorema de Taylor.

²Para los alcances de este trabajo, los errores por marea terrestre, Sagnac y otros han sido resumidos en un solo término, no por ser menos importantes, sino por razones de simplicidad. Los mismos se verán eliminados durante el cálculo de simples y dobles diferencias de ecuaciones.

Suponiendo que se tiene una observación de pseudodistancia P_r^s a un satélite s desde un receptor r , sobre dicha observación se aplica una corrección troposférica, ionosférica, de error de reloj del satélite y las otras correcciones necesarias para eliminar cualquier otro término, obteniéndose \dot{P}_r^s . Luego:

$$\dot{P}_r^s = R_r^s + \delta t_r c \quad (2.7)$$

$$\dot{P}_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} + \delta t_r c \quad (2.8)$$

Partiendo de una coordenada aproximada $\bar{X}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$, la ecuación (2.8) puede pensarse como una función de \bar{X} , δt_r , por lo que $\dot{P}_r^s = f(\bar{X}_0, \delta t_0)$. Luego, el polinomio de Taylor para la ecuación (2.8) será de la forma:

$$f(\bar{X}, \delta t) \approx f(\bar{X}_0, \delta t_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial X_r} \right|_{X_0} \Delta X_r + \left. \frac{\partial f}{\partial Y_r} \right|_{Y_0} \Delta Y_r + \left. \frac{\partial f}{\partial Z_r} \right|_{Z_0} \Delta Z_r + \left. \frac{\partial f}{\partial \delta t_r} \right|_{\delta t_0} \Delta \delta t_r \quad (2.9)$$

Luego, si se toma $\delta t_r = 0$:

$$f(\bar{X}_0, \delta t_0) = \dot{P}_{r0}^s = \sqrt{(X_0 - X^s)^2 + (Y_0 - Y^s)^2 + (Z_0 - Z^s)^2} \quad (2.10)$$

Entonces, la ecuación linealizada tendrá la forma:

$$\dot{P}_r^s = \dot{P}_{r0}^s + \frac{(X_0 - X^s)}{\dot{P}_{r0}^s} \Delta X_r + \frac{(Y_0 - Y^s)}{\dot{P}_{r0}^s} \Delta Y_r + \frac{(Z_0 - Z^s)}{\dot{P}_{r0}^s} \Delta Z_r + c \Delta t_r \quad (2.11)$$

Puede observarse fácilmente de la ecuación (2.11) que la solución de un hipotético sistema formado por 4 o más ecuaciones dará como resultado las incógnitas ΔX_r , ΔY_r , ΔZ_r y Δt_r . Las mismas corresponden a las diferencias entre las coordenadas aproximadas y las buscadas, más el error de sincronización del reloj del receptor. Nótese también que es posible resolver el sistema por mínimos cuadrados en caso de contarse con más de 4 observaciones.

Ahora bien, el desarrollado método plantea un inconveniente: es necesario conocer una coordenada aproximada antes de poder resolver el sistema, lo cual implica que la resolución del mismo será iterativa. Un procedimiento posible sería partir desde el geocentro y comenzar a iterar hasta lograr la convergencia (Petrovsky y Tretyak, 2007). Esta tarea podría demorar un tiempo, hasta conseguir una coordenada para la cual la corrección sea mínima. Este proceso es además necesario para poder calcular una latitud que permita determinar, con mediana exactitud, la velocidad de rotación terrestre, corrección necesaria para la eliminación del término ϵ_p .

2.3. Algoritmo de Bancroft: alternativa a los sistemas no lineales

Existe un método que elimina la necesidad de realizar iteraciones para resolver la intersección inversa en el espacio. Este algoritmo, conocido popularmente como algoritmo de Bancroft

en honor a su autor, el Dr. Stephen Bancroft, permite resolver en un solo paso el problema de la intersección inversa, arribando a dos soluciones posibles. De éstas soluciones, solamente una es la correcta, siendo muy fácil identificar cada una, ya que la errónea es físicamente absurda.

Formulando nuevamente la ecuación de la pseudodistancia, obviando los términos de errores de retardos ionosféricos y troposféricos y de reloj de satélite:

$$\dot{P}_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2} + \delta t_r c \quad (2.12)$$

Trabajando la expresión (2.12) y reordenando los términos, puede obtenerse:

$$-(X_r^2 + Y_r^2 + Z_r^2 - (\delta t_r c)^2) = (X^{s2} + Y^{s2} + Z^{s2} - \dot{P}_r^s) - 2(X^s X_r + Y^s Y_r + Z^s Z_r - \dot{P}_r^s \delta t_r c) \quad (2.13)$$

Luego, definiendo el producto interno de Lorentz (Fernández, González y Rubio, 2001):

$$\langle g, h \rangle = g^T M h$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Es posible expresar la ecuación (2.13) de forma más compacta:

$$\frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} \bar{X}^s \\ \dot{P}_r^s \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{X}^s \\ \dot{P}_r^s \end{bmatrix} \right\rangle - \left\langle \begin{bmatrix} \bar{X}^s \\ \dot{P}_r^s \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \dot{P}_r^s \end{bmatrix} \right\rangle + \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix} \right\rangle = 0 \quad (2.14)$$

Donde \bar{X}_r corresponde al vector de coordenadas geocéntricas del receptor y \bar{X}^s a al vector de coordenadas geocéntricas del satélite. \dot{P}_r^s corresponde a la pseudodistancia entre el satélite s y el receptor r . Por último, $\delta t_r c$ representa el error de sincronización del reloj del receptor.

Como ya se ha visto, cada satélite observado por el receptor permite construir una ecuación del tipo (2.14). Con 4 observaciones, será posible resolver el sistema. Si se colocan los datos conocidos en una matriz B (coordenadas de los satélites y pseudodistancias a los mismos) se obtiene:

$$B = \begin{bmatrix} X^{s1} & Y^{s1} & Z^{s1} & \dot{P}_r^{s1} \\ X^{s2} & Y^{s2} & Z^{s2} & \dot{P}_r^{s2} \\ X^{s3} & Y^{s3} & Z^{s3} & \dot{P}_r^{s3} \\ X^{s4} & Y^{s4} & Z^{s4} & \dot{P}_r^{s4} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Luego, definiendo los siguientes términos:

$$E = \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix} \right\rangle \quad a^s = \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} \bar{X}^s \\ \dot{P}_r^s \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{X}^s \\ \dot{P}_r^s \end{bmatrix} \right\rangle \quad (2.16)$$

Donde a^s deberá calcularse para cada satélite observado. Cada valor de a^s podrá luego formar una matriz columna a .

Luego, reemplazando (2.16) y (2.15) en la ecuación (2.14) y definiendo el vector $e = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$:

$$a - BM \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix} + Ee = 0 \quad (2.17)$$

Despejando (2.17), la ecuación de navegación queda definida de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix} = (BM)^{-1}(Ee + a) \quad (2.18)$$

Como puede observarse en (2.16), el término E incluye a las incógnitas \bar{X}_r y $\delta t_r c$, por lo que (2.18) no está perfectamente despejada.

Recordando que $\langle Mg, Mh \rangle = \langle g, h \rangle$ (Fernández y otros, 2001) e insertando (2.18) en (2.17) es posible arribar a la siguiente expresión cuadrática:

$$\langle B^{-1}e, B^{-1}e \rangle E^2 + 2(\langle B^{-1}e, B^{-1}a \rangle - 1)E + \langle B^{-1}a, B^{-1}a \rangle = 0 \quad (2.19)$$

Debe observarse lo notable de la expresión anterior. Se ha conseguido una ecuación cuadrática de E , de donde el valor de $E = \frac{1}{2} \left\langle \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{X}_r \\ \delta t_r c \end{bmatrix} \right\rangle$ puede obtenerse resolviendo la ecuación (2.19) en forma habitual. El valor correcto de E deberá ser positivo y de magnitud similar a una pseudodistancia ($20^6 m$ aproximadamente).

Una vez hallado el valor correcto de E , podrá resolverse la ecuación (2.18) de donde se obtienen los valores del vector \bar{X}_r y $\delta t_r c$.

La extensión de este método para resolver un sistema con más de 4 ecuaciones de observación debe contemplar la utilización de una matriz pseudoinversa, dado que la matriz B no será cuadrada y por lo tanto no inversible.

Esta alternativa para la resolución del sistema de navegación es de especial interés durante el desarrollo de los algoritmos de procesamiento utilizados para este trabajo. Esta rutina permite el cálculo inmediato de una coordenada aproximada para cualquier estación sin necesidad de iteraciones, por lo que la velocidad de procesamiento se ve incrementada en forma muy significativa. Además, ha de destacarse que es posible calcular una coordenada (dentro de los 10 a 20 metros) aún sin corregir las pseudodistancias por el término ϵ_p .

2.4. Posicionamiento diferencial

Se entiende por posicionamiento diferencial a la obtención de coordenadas a partir de mediciones realizadas desde dos receptores en forma simultánea observando al mismo tiempo satélites que son visibles desde ambas estaciones. La obtención de dichas coordenadas diferenciales puede realizarse en post-proceso o en tiempo real, dependiendo de la tecnología utilizada. El post-proceso permite obtener las coordenadas luego de la medición, mientras que el método de tiempo real ofrece la posibilidad de obtener las coordenadas directamente en el campo, durante la medición. Habitualmente, se hablará de base y móvil o *rover* al equipo situado sobre una coordenada conocida y al ubicado sobre la coordenada a obtener, respectivamente.

A su vez, el post-proceso ofrece dos posibilidades; modo estático o cinemático. El modo estático, como lo indica la palabra, no contempla el desplazamiento del equipo móvil durante la medición, mientras que el modo cinemático implica que éste último se encuentra en movimiento. La base siempre se encuentra inmóvil, sin importar el modo utilizado.

Durante el desarrollo de este trabajo, se hará foco sobre el procesamiento diferencial en modo post-proceso estático. Este modo se utiliza como una herramienta para obtener una coordenada que luego podría ser utilizada para “apoyar” un relevamiento posterior.

2.4.1. Observable de código y fase

Existen muchas observables posibles que pueden ser realizadas durante una medición con sistemas de navegación global. Las mismas pueden dividirse en dos grupos: código y fase. Las observaciones de fase implican que la señal portadora (tanto L1 como L2 en receptores doble frecuencia) se replica internamente en el receptor para comparar la diferencia de fase entre la señal recibida y la replicada. La observable en sí es la cuenta de ciclos de diferencia entre éstas. Utilizándolas, es posible obtener coordenadas sub-centimétricas a través de la metodología conocida como “resolución del número inicial de ambigüedades”. Se trata de un tema muy extenso y sobre el cuál se han desarrollado una infinidad de técnicas y algoritmos, razón por la cuál solo se menciona brevemente durante este trabajo, por escaparse del objetivo del mismo.

Durante una observación de código, lo que se almacena en el receptor GPS es la pseudo-distancia computada para un instante determinado. Dicho almacenamiento se realiza sin corregir ninguno de los errores mencionados anteriormente (reloj del receptor, reloj de satélite, ionosférico, troposférico, etc). Adicionalmente, muchos receptores son capaces de computar también el efecto doppler observado durante la recepción de las señales.

La observación de pseudodistancias permitirá, como se verá más adelante, diferenciar las observaciones de las estaciones, lográndose obtener un $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ respecto de la estación base. Dado que la base cuenta con coordenadas bien conocidas, la coordenada del móvil puede obtenerse fácilmente.

Esta metodología permite obtener coordenadas sub-métricas, cuando las condiciones de observación y distancias entre base y móvil así lo permitan. Esta solución ofrece un paso intermedio entre los receptores geodésicos –con observable de fase– que entregan coordenadas sub-centimétricas y los navegadores de mano, que permiten precisiones de 5 a 10 metros.

2.4.2. Simples diferencias de código

Recordando la ecuación de observación a un satélite s (2.6), y planteándola para dos receptores, A y B , se obtiene el siguiente par de ecuaciones:

$$P_{r_A}^s = R_{r_A}^s + \delta t_{iono}c + \delta t_{tropo}c + \epsilon_p + (\delta t_{r_A} - \delta t^s)c \quad (2.20)$$

$$P_{r_B}^s = R_{r_B}^s + \delta t_{iono}c + \delta t_{tropo}c + \epsilon_p + (\delta t_{r_B} - \delta t^s)c \quad (2.21)$$

Expandiendo los errores de reloj:

$$P_{r_A}^s = R_{r_A}^s + \delta t_{iono}c + \delta t_{tropo}c + \epsilon_p + \delta t_{r_A}c - \delta t^s c \quad (2.22)$$

$$P_{r_B}^s = R_{r_B}^s + \delta t_{iono}c + \delta t_{tropo}c + \epsilon_p + \delta t_{r_B}c - \delta t^s c \quad (2.23)$$

Luego, si el área de trabajo es lo suficientemente reducida como para suponer que las condiciones meteorológicas son las mismas y que las trayectorias de las señales GPS atraviesan la ionósfera en condiciones tan similares que los retardos introducidos a la señal pueden asimilarse como idénticos, es posible eliminar o disminuir en forma muy considerable los errores que provienen de condiciones comunes a ambos receptores.

En ese caso, sustrayendo (2.23) de (2.22) se obtiene una ecuación de simple diferencia:

$$P_{r_{AB}}^s = P_{r_A}^s - P_{r_B}^s = R_{r_A}^s - R_{r_B}^s + \delta t_{r_A}c - \delta t_{r_B}c \quad (2.24)$$

Hasta el momento, se han hecho, en algunos casos, una serie de suposiciones en las que generalmente siempre se descartan algunos errores, como por ejemplo los retardos ionosféricos y troposféricos. Ha de destacarse que no es el caso aquí presentado. Durante la estimación de un retardo, han de aplicarse modelos de ionósfera y tropósfera de manera de minimizar su influencia. Sin embargo, para la ecuación (2.24), dichos retardos han sido completamente eliminados, suponiendo la condición de cercanía entre las estaciones.

2.4.3. Dobles diferencias de código

Durante el cálculo de las dobles diferencias, se procede utilizando las simples diferencias calculadas anteriormente. Como se ha visto, cada satélite tiene una simple diferencia que ha cancelado los retardos troposféricos, ionosféricos y otros comunes relacionados a los satélites³.

Observando la ecuación (2.24), aún están presentes los errores de sincronización de los relojes de los receptores. Si nuevamente se restan las simples diferencias, se eliminarían los mencionados errores.

Para calcular dobles diferencias, deberán diferenciarse las simples diferencias entre un satélite i y j . Esto lleva a la necesidad de establecer lo que se denomina satélite de referencia.

³Además del término ϵ_p presentado en la ecuación (2.4)

En próximos capítulos se ampliará el tema de la necesidad de recurrir a un único satélite común para calcular todas las dobles diferencias.

Sea una simple diferencia entre el receptor A y B para el satélite i :

$$P_{rAB}^{s_i} = R_{r_A}^{s_i} - R_{r_B}^{s_i} + \delta t_{r_A} c - \delta t_{r_B} c \quad (2.25)$$

Sea una simple diferencia entre el receptor A y B para el satélite j :

$$P_{rAB}^{s_j} = R_{r_A}^{s_j} - R_{r_B}^{s_j} + \delta t_{r_A} c - \delta t_{r_B} c \quad (2.26)$$

Restando la ecuación (2.26) de (2.25) se obtiene la doble diferencia:

$$P_{rAB}^{s_{ij}} = P_{rAB}^{s_i} - P_{rAB}^{s_j} = R_{r_A}^{s_i} - R_{r_B}^{s_i} - R_{r_A}^{s_j} + R_{r_B}^{s_j} \quad (2.27)$$

Habiéndose eliminado de esta forma los errores de sincronización de los relojes de los receptores.

2.4.4. Triples diferencias

Las triples diferencias tienen en cuenta la diferencia entre épocas de dobles diferencias. Si se tiene la doble diferencia $P_{rAB}^{s_{ij}}$ para una época 0, y luego se diferencia con su homóloga pero de la época 1, se obtendrá el cambio de la doble diferencia. Esta técnica es utilizada para la detección de saltos de ciclo durante procesamiento de observable de fase. Las triples diferencias no ocupan una especial importancia en este trabajo, ya que existen otros métodos de detección de errores groseros (por pérdida de satélites u otros).

Capítulo 3

Modelos estocásticos

Todos los sistemas basados en mediciones de variables físicas tienen dos modelos necesarios para su funcionamiento. Uno determinístico, basado en las formulaciones matemáticas necesarias para realizar las mediciones, y otro de origen estocástico o probabilístico que describe el comportamiento aleatorio de las discrepancias entre las observaciones y el modelo determinístico (Tiberius y Kenselaar, 1998).

En agrimensura, la relación entre el modelo determinístico y las observaciones está basada en la geometría euclidiana y la física. Dicho modelo fue planteado durante el capítulo anterior en el que se estudiaron las denominadas **ecuaciones de observación**. Para el modelo estocástico, la relación se crea a través de la matriz varianza-covarianza (Tiberius y Kenselaar, 1998).

Para poner esto último en términos más simples, debe pensarse en el siguiente ejemplo: suponiendo que se ha medido n veces una distancia utilizando un electro-distanciómetro láser (EDM), las observaciones tendrán una discrepancia relacionada al comportamiento estocástico del equipo utilizado. Luego, sería necesario hallar el más probable de los valores para la mencionada distancia. Es aquí donde aparece la necesidad de realizar un ajuste por mínimos cuadrados. Como ya se ha mencionado, es posible introducir en dicho ajuste un modelo estocástico a través de la matriz varianza-covarianza, muchas veces llamada matriz covarianza para abreviar. La inversa de dicha matriz es lo que conocemos popularmente como la “matriz de pesos”, una matriz que –habitualmente– tiene la inversa de la varianza de las observaciones en su diagonal principal y ceros en el resto de las posiciones.

Dicha matriz, tendría la siguiente forma:

$$P = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\sigma^2} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Siendo σ el desvío esperado del instrumento de medición respecto de la media. Para hablar sobre el “desvío esperado”, debe primero hacerse una introducción sobre el carácter aleatorio de las observaciones físicas. Una observación o medición forma parte lo que se conoce como proceso aleatorio.

3.1. Proceso aleatorio

Un proceso aleatorio se describe como una serie de observaciones discretas o continuas que se encuentran asociadas a un parámetro determinístico (Becerra, 2008).

Definiendo una variable aleatoria $x(t)$, donde t es una época de medición, la misma tomará valores diferentes cada vez que se repita el experimento. Esto se traduce en que, para cualquier variable aleatoria, la probabilidad de que ésta tome valores en un intervalo determinado responde a la siguiente expresión (Leick, 1993):

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x)dx$$

Donde $f(x)$ es la función de densidad. Esta expresión permite calcular la probabilidad de que la variable aleatoria $x(t)$ asuma un valor en el intervalo $[a, b]$

En agrimensura, habitualmente las observaciones responden a una distribución normal (Leick, 1993), pudiéndose expresar su función de densidad de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)}$$

El gráfico de la función de densidad normal tiene la apariencia de una campana, usualmente llamada **campana de Gauss**.

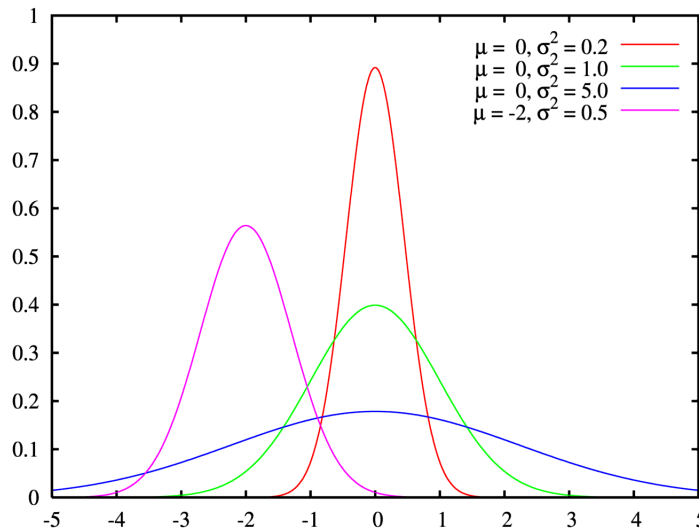


Figura 3.1: Gráfico de la distribución normal para diferentes valores de μ y σ

Entonces, es posible interpretar las observaciones realizadas durante una medición como elementos del espacio muestral de una variable aleatoria. Llámese L al vector compuesto por n observaciones realizadas utilizando algún instrumento, se dice que L se distribuye normalmente y se denota $L \sim N(\bar{L}, \Sigma)$ donde Σ se conoce como la matriz varianza-covarianza y N es una distribución normal multivariable (Leick, 1993). \bar{L} corresponde al vector que contiene a la media de la población.

Dado que durante un ajuste por mínimos cuadrados no se utiliza la matriz covarianza sino que se utiliza la matriz de pesos, la misma se define como:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma^{-1} \quad (3.2)$$

Donde σ_0^2 se conoce como la varianza unitaria de referencia *a priori*. Este es un factor arbitrario por el cual se multiplica la inversa de la matriz covarianza para obtener la matriz de pesos. Un posterior ajuste por mínimos cuadrados permite estimar la varianza de referencia en base a las observaciones y la matriz de pesos, denotada por Leick como $\hat{\sigma}_0^2$. A esto se lo conoce como varianza unitaria de referencia *a posteriori*. Si luego del ajuste, σ_0^2 y $\hat{\sigma}_0^2$ son estadísticamente iguales, es posible estimar que el ajuste es correcto. Habitualmente, a σ_0^2 se le otorga el valor de 1, por lo que la matriz de pesos es directamente la inversa de la matriz covarianza. Luego, es esperable que el valor de $\hat{\sigma}_0^2$ sea también estadísticamente cercano a 1.

3.2. Selección del modelo estocástico adecuado

Para realizar un ajuste por mínimos cuadrados y arribar a una solución óptima, es preciso seleccionar un modelo estocástico adecuado a los tipos de observaciones que se hayan realizado. De dicha selección dependerá no solamente el valor de las denominadas elipses de error, extraídas de la matriz covarianza a posteriori, sino también de garantizar que el ajuste no sufra de una distorsión por asignar varianzas equivocadas a cada observación. Un ejemplo de esto último podría ser asignar una varianza pequeña a una observación con alto grado de indeterminación.

Para el caso de observaciones tradicionales (realizadas por ejemplo con cintas métricas o teodolitos), la selección del modelo estocástico suele determinarse según diversas fórmulas ampliamente estudiadas durante los cursos de topografía. Sin embargo, para la selección de un modelo estocástico para observaciones de pseudodistancia, la tarea resulta ser un tanto más problemática, ya que existen varios modelos utilizados por diversos autores. A continuación se hará un repaso de los conceptos relacionados a los ajustes por mínimos cuadrados.

3.2.1. Mínimos cuadrados

Al realizar un ajuste por mínimos cuadrados, la notación habitualmente utilizada es:

$$A^T P A X = A^T P L \quad (3.3)$$

Donde la matriz A representa al modelo determinístico. Dado que el carácter del modelo determinístico es no lineal, las ecuaciones de observación deberán ser linealizadas. Por ello, la matriz X expresa las correcciones a aplicar a las coordenadas aproximadas. Suponiendo que con una sola iteración se arriba al resultado final, sea X_0 la matriz de coordenadas aproximadas y X_a la solución final, entonces $X = X_a - X_0$. El vector L y la matriz P ya fueron definidos oportunamente.

Luego de hallada la solución, puede calcularse la matriz de observaciones ajustadas L_a , por lo que es posible calcular la matriz de desvíos V como:

$$V = L - L_a \quad (3.4)$$

La estimación de X por mínimos cuadrados está basada en la minimización de la función $V^T PV$ (Leick, 1993). Luego, $\hat{\sigma}_0^2$ puede computarse de la siguiente fórmula (Leick, 1993):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T PV}{n - r} \quad (3.5)$$

Donde n representa la cantidad de incógnitas a resolver y r el número de ecuaciones de observación. Suele llamarse grados de libertad al valor obtenido de $n - r$. Es posible demostrar que (Leick, 1993):

$$E(\hat{\sigma}_0^2) = \sigma_0^2 \quad (3.6)$$

Donde la función $E(x)$ representa la función esperanza. Como ya se había mencionado, el valor de $\hat{\sigma}_0^2$ debe ser estadísticamente igual a $\sigma_0^2 = 1$. Dado que la afirmación “estadísticamente igual” no implica igualdad matemática, deberá establecerse un criterio para aceptar o rechazar un ajuste determinado. A este criterio se lo llama “test de bondad de ajuste”.

3.3. Test de bondad de ajuste

Como ya se ha visto en la ecuación (3.5), despejando es posible llegar a:

$$V^T PV = \hat{\sigma}_0^2(n - r) \quad (3.7)$$

Leick demuestra que la expresión (3.7) se distribuye según una distribución χ^2 de $n - r$ grados de libertad, y se denota $\hat{\sigma}_0^2(n - r) \sim \chi_{n-r}^2$.

χ^2 es una función de distribución de probabilidad continua, siendo ésta un caso particular de la distribución gamma. La misma tiene diversas aplicaciones en la inferencia estadística. Su parámetro $n - r$ se denomina “grados de libertad”. En la figura 3.2 se presenta un gráfico para 5 grados de libertad (k) diferentes.

Se define un test de hipótesis tal que permita hallar si el ajuste ha sido distorsionado o no. Las hipótesis serán:

$$H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2 \quad (3.8)$$

$$H_1 : \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 \quad (3.9)$$

La hipótesis H_0 dicta que el valor de σ *a posteriori* es estadísticamente igual a σ *a priori*.

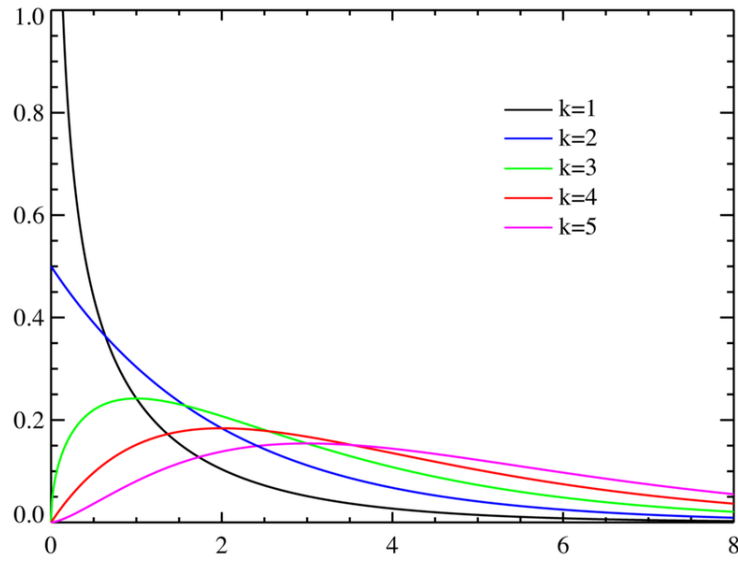


Figura 3.2: Gráfico de la distribución χ^2 para diferentes valores de k

Luego, recordando que $\hat{\sigma}_0^2$ es una variable aleatoria, entonces

$$\chi^2 = \hat{\sigma}_0^2(n - r) \quad (3.10)$$

Si el valor calculado para $\chi^2 = \hat{\sigma}_0^2(n - r)$ es tal que,

$$\chi^2 < \chi_{n-r, 1-\alpha/2}^2 \quad (3.11)$$

$$\chi^2 > \chi_{n-r, \alpha/2}^2 \quad (3.12)$$

entonces H_0 es rechazada y por lo tanto, también el ajuste. El valor de α es la probabilidad de cometer un error de tipo I, o la probabilidad de rechazar H_0 aunque ésta sea verdadera. Usualmente dicho valor se fija en 0.05.

Se ha presentado hasta aquí una herramienta que permite aceptar o rechazar un ajuste determinado. El rechazo podría provocarse tanto por un modelo estocástico o determinístico inadecuado.

3.4. Modelos estocásticos propuestos

Durante la etapa de investigación, se hallaron diversos modelos susceptibles de aplicación. Este es el caso del trabajo presentado por Anh Quan Le en la universidad de Delft, Holanda, titulado *Single-point positioning with C/A code*.

Durante el mismo, Le propone asignar una vacilación a cada observación de pseudodistancia según la siguiente fórmula:

$$\sigma_i = URA \frac{1.02}{\sin E_i + 0.02} \quad (3.13)$$

donde E_i representa el ángulo de elevación para el satélite i . El factor URA corresponde al valor denominado *user range accuracies*, transmitido en el mensaje de navegación GPS¹. Esto implica que la calidad de la observación de pseudodistancia depende de un factor otorgado por Navstar y del ángulo de elevación del satélite. La relación con el ángulo de elevación está dada por el hecho de que una señal que debe atravesar una porción mayor de la ionósfera y la tropósfera, tendrá un ruido adicional, y una relación señal-ruido² (o SNR por sus siglas en inglés) menor que otro ubicado en el zenit.

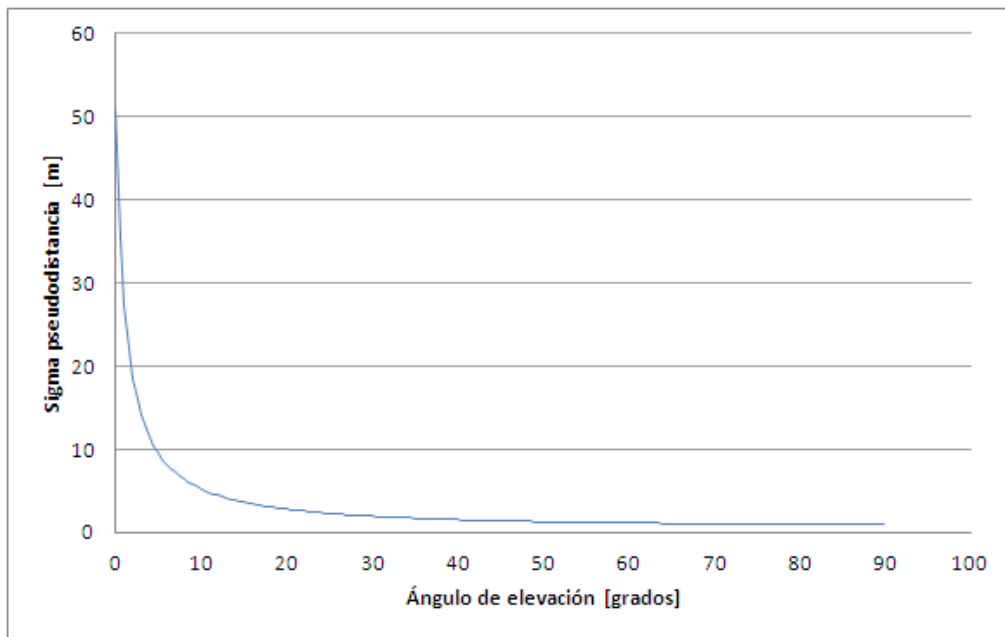


Figura 3.3: Gráfico de la función propuesta por Le.

Otra propuesta es la extraída del libro de Leick, *GPS satellite surveying*. Durante el desarrollo del capítulo 3, Leick propone la siguiente expresión para determinar la precisión de una observación de pseudodistancia:

$$\sigma_i = \frac{c}{R_C} \sqrt{\frac{B_L d}{2SNR}} \quad (3.14)$$

donde c es la velocidad de la luz, R_C la frecuencia del código C/A y B_L el ancho de banda necesario para recibir la señal GPS, expresado en unidades de código C/A (en inglés, *chips*³). Debe recordarse que debido a la rotación de la tierra, a la velocidad de los satélites y

¹Ver sección 1.3.2 p. 4

²La relación señal ruido corresponde al cociente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido. Un SNR de 1 implica que ambas potencias son iguales, por lo que no es factible discernir entre ambas. Existen muchas formas de expresar este cociente, por ejemplo la forma logarítmica, que permite obtener un valor en decibelios.

³Un *chip* equivale a un 1 o un 0 del código C/A.

efectos ionosféricos, la señal recibida desde los satélites no está centrada en 1575.42 Mhz. La misma sufre un corrimiento resultado del efecto Doppler, el cual debe tenerse en cuenta para el cálculo de B_L . Algunos receptores desplazan una “ventana” de ancho de banda para disminuir la posibilidad de captación de ruido, de acuerdo el efecto Doppler estimado. Por último, el factor d representa la capacidad por parte del receptor de apreciar diferencias de fase menores a 1 *chip*. Esto depende directamente de las características constructivas del correlador del receptor GPS. SNR es el valor del cociente señal-ruido observado por el receptor.

Obsérvese que la expresión anterior no tiene en cuenta la elevación del satélite, sin embargo hace uso de una herramienta más poderosa: el SNR. Este valor permite evaluar en forma cuantitativa, la calidad con la que el correlador del receptor ha logrado identificar la señal del satélite. Esto significa que se están teniendo en cuenta otras posibles fuentes de ruido en el receptor, como por ejemplo, el paso de la señal GPS a través de un sector de ionósfera más ruidoso que un satélite ubicado en un azimut opuesto.

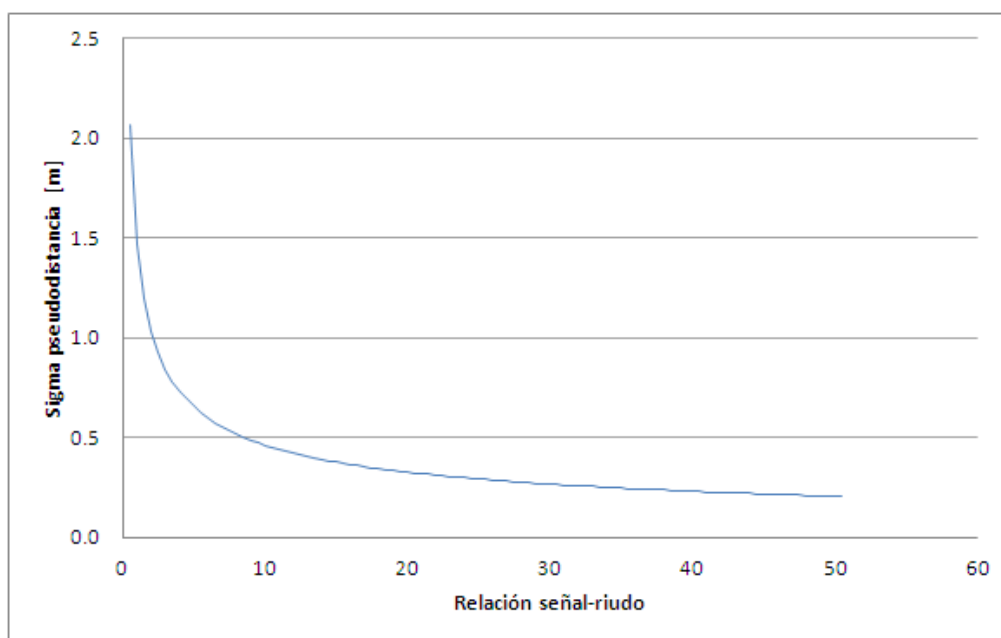


Figura 3.4: Gráfico de la función propuesta por Leick.

En capítulos posteriores, se pondrán a prueba estos dos modelos presentados con el objetivo de seleccionar el que mejor se adecue al tipo de observaciones realizadas.

3.5. Breve comentario sobre correlación de observaciones

Cuando se ha hablado de la matriz de pesos, la misma siempre fue diagonal con ceros en el resto de los valores. Esto da la pauta de que se está asumiendo que todas las mediciones realizadas son independientes. Es decir, que no existe correlación alguna entre las diferentes mediciones. Para el ejemplo del distanciómetro, presentado al comienzo de este capítulo, esto es verdadero, ya que se toma el instrumento y se realiza una medición por vez.

A diferencia de un EDM, un receptor GPS realiza mediciones a satélites al mismo tiempo, por lo que una época de pseudodistancias registrada corresponde a una “imagen” de las varia-

bles internas del receptor en ese instante dado. Pero, recordando que durante el post-proceso se realizarán simples y dobles diferencias, es posible suponer que se han eliminado de las ecuaciones todos los errores por retardos. Luego, la pregunta más lógica sería si las observaciones de pseudodistancia están correlacionadas entre sí.

La respuesta a esta pregunta podría intuirse como afirmativa, sin embargo, diversas pruebas realizadas revelan que, aplicando un modelo estocástico que contemple un análisis de correlación entre las observaciones da como resultado valores más alejados de la realidad que un modelo en el que se consideran a las observaciones como independientes (Becerra, 2008).

Este breve comentario es pertinente, dado que durante el desarrollo de todo el capítulo siempre se han presentado a las observaciones de pseudodistancias como independientes entre sí. Becerra recomienda un estudio más en profundidad para lograr un mejor entendimiento sobre los resultados hallados durante su trabajo.

Capítulo 4

Aplicación de dobles diferencias

Hasta el momento se han estudiado los temas teóricos que permiten comprender los modelos involucrados durante una observación de código GPS. Estos modelos deben ahora plasmarse en algoritmos que posibiliten la ejecución práctica de todo lo hasta aquí visto.

Dichos algoritmos son esquemas lógicos o diagramas de flujo que son independientes del lenguaje de programación utilizado. Estos diagramas permiten un desarrollo del programa más ordenado y prolijo. Esta tarea es una especialidad en sí misma y no se pretende profundizar en las cuestiones lógicas y estructurales del diseño de algoritmos.

4.1. Ecuaciones del modelo determinístico

Durante el desarrollo de la sección 2.4.3 (p. 16), se estudiaron y dedujeron las ecuaciones de dobles diferencias de código GPS. Dado que las mismas contienen términos no lineales, se deberá proceder a su linealización. La combinación de las ecuaciones (2.27) y (2.11) dará lugar a una ecuación de dobles diferencias linealizada.

Aplicando a las ecuaciones la notación para las estaciones A, B y los satélites i, j , una ecuación de dobles diferencias linealizada tendrá la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_{AB}^{ij} = & P_{B_0}^j - \frac{X^j - X_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta X_B - \frac{Y^j - Y_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta Y_B - \frac{Z^j - Z_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta Z_B \\ & - P_{B_0}^i + \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta X_B + \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta Y_B + \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta Z_B \\ & - P_{A_0}^j + \frac{X^j - X_{A_0}}{P_{A_0}^j} \Delta X_A + \frac{Y^j - Y_{A_0}}{P_{A_0}^j} \Delta Y_A + \frac{Z^j - Z_{A_0}}{P_{A_0}^j} \Delta Z_A \\ & + P_{A_0}^i - \frac{X^i - X_{A_0}}{P_{A_0}^i} \Delta X_A - \frac{Y^i - Y_{A_0}}{P_{A_0}^i} \Delta Y_A - \frac{Z^i - Z_{A_0}}{P_{A_0}^i} \Delta Z_A \end{aligned} \quad (4.1)$$

Donde el subíndice 0 en los términos X, Y, Z corresponden a coordenadas *a priori*. Los términos P hacen referencia a las pseudodistancias calculadas en base a dichas coordenadas *a priori*.

Luego, sabiendo que uno de los receptores GPS se ubicará sobre un punto de coordenadas

conocidas, $\Delta X_A = 0, \Delta Y_A = 0, \Delta Z_A = 0$ por lo que la ecuación (4.1) quedará de la siguiente forma:

$$P_{AB}^{ij} = P_{B_0}^j - \frac{X^j - X_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta X_B - \frac{Y^j - Y_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta Y_B - \frac{Z^j - Z_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta Z_B - P_{B_0}^i + \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta X_B + \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta Y_B + \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta Z_B - P_{A_0}^j + P_{A_0}^i \quad (4.2)$$

Reordenando la ecuación anterior, y definiendo los términos de dobles diferencias estimadas en base a coordenadas *a priori*:

$$P_{AB}^{ij} - P_{AB_0}^{ij} = -\frac{X^j - X_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta X_B - \frac{Y^j - Y_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta Y_B - \frac{Z^j - Z_{B_0}}{P_{B_0}^j} \Delta Z_B + \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta X_B + \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta Y_B + \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} \Delta Z_B \quad (4.3)$$

Se ha arribado a una ecuación de observación de dobles diferencias para las estaciones A, B y satélites i, j . Nótese que hay 3 incógnitas multiplicadas por un término en el que se incluyen las coordenadas de sendos satélites y pseudodistancias calculadas de las coordenadas *a priori*.

Dado que hay 3 incógnitas y el sistema se calculará utilizando el método de los mínimos cuadrados, de deberá contar con un mínimo de 4 ecuaciones de dobles diferencias.

4.1.1. Resolución por mínimos cuadrados

La ecuación (4.3) es de la forma $AX = L$. Luego, suponiendo la existencia de observaciones a satélites i, j, k, l, m , las matrices A, X y L pueden definirse como:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{X^j - X_{B_0}}{P_{B_0}^j} & \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Y^j - Y_{B_0}}{P_{B_0}^j} & \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Z^j - Z_{B_0}}{P_{B_0}^j} \\ \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{X^k - X_{B_0}}{P_{B_0}^k} & \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Y^k - Y_{B_0}}{P_{B_0}^k} & \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Z^k - Z_{B_0}}{P_{B_0}^k} \\ \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{X^l - X_{B_0}}{P_{B_0}^l} & \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Y^l - Y_{B_0}}{P_{B_0}^l} & \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Z^l - Z_{B_0}}{P_{B_0}^l} \\ \frac{X^i - X_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{X^m - X_{B_0}}{P_{B_0}^m} & \frac{Y^i - Y_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Y^m - Y_{B_0}}{P_{B_0}^m} & \frac{Z^i - Z_{B_0}}{P_{B_0}^i} - \frac{Z^m - Z_{B_0}}{P_{B_0}^m} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta X_B \\ \Delta Y_B \\ \Delta Z_B \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$L = \begin{bmatrix} P_{AB}^{ij} - P_{AB_0}^{ij} \\ P_{AB}^{ik} - P_{AB_0}^{ik} \\ P_{AB}^{il} - P_{AB_0}^{il} \\ P_{AB}^{im} - P_{AB_0}^{im} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Debe observarse que las simples diferencias se han formado siempre utilizando un satélite común a todas las ecuaciones. A este satélite se lo suele llamar satélite de referencia. Esta técnica facilita la eliminación de posibles errores sistemáticos, mediante la inspección de residuos de dobles diferencias.

Luego, el sistema de ecuaciones normales tendrá la siguiente forma:

$$A^T P A X = A^T P L \quad (4.7)$$

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (4.8)$$

$$X = Q A^T P L \quad (4.9)$$

Donde A , X y L ya fueron definidas y P corresponde al modelo estocástico seleccionado.

Los desvíos o residuos de dobles diferencias podrán calcularse como:

$$A X = L - V \quad (4.10)$$

$$V = L - A X \quad (4.11)$$

Estos residuos de dobles diferencias permitirán estimar el valor de $\hat{\sigma}_0^2$ *a posteriori* resolviendo:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - r} \quad (4.12)$$

Por último, los valores correspondientes a las varianzas de X podrán calcularse de:

$$\Sigma = \hat{\sigma}_0^2 Q \quad (4.13)$$

4.2. Algoritmos para procesamiento de vectores observados en código C/A

A continuación se describe el algoritmo utilizado para el procesamiento de vectores observados utilizando la técnica descrita durante el presente trabajo.

Para la realización de estos algoritmos, fue necesaria la implementación de un procedimiento que permitiera la carga de datos externos, observados utilizando receptores GPS. Esta incorporación de datos se realiza en forma estándar utilizando el formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*). Es sabido que cada fabricante de receptores decide implementar internamente en sus receptores su propio formato de almacenamiento de datos. Es por ello que el formato RINEX resuelve el problema de la incorporación de datos provenientes de diferentes marcas de GPS. La versión de RINEX implementada fue la 2.11, y podrán encontrarse los detalles sobre la conversión a este formato en el Anexo A, sección A.3, p. 108.

A continuación se presenta un resumen de los bloques y algoritmos generados:

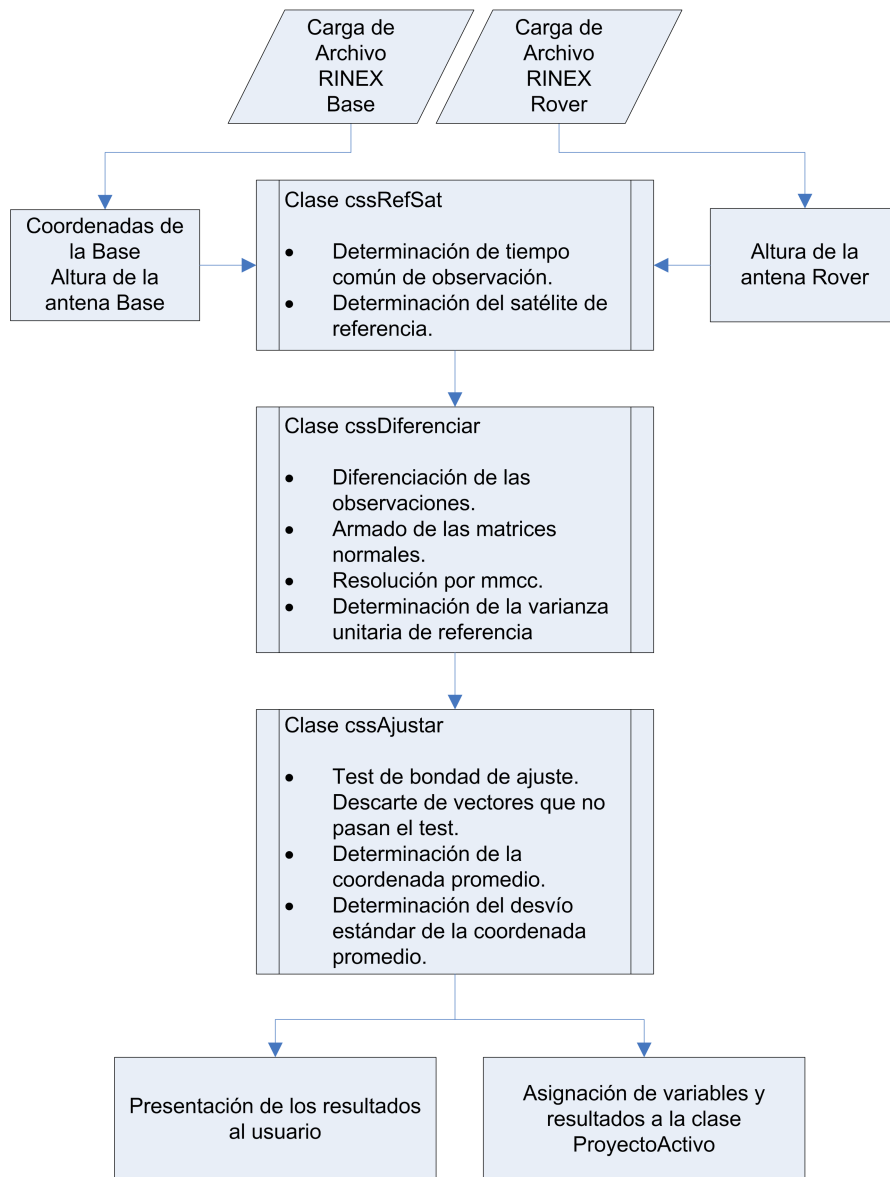


Figura 4.1: Diagrama de flujo con los bloques generales

A continuación se detalla cada algoritmo presentado en el diagrama de flujo general. Entre paréntesis se especifica el archivo de código disponible en el soporte digital de este trabajo.

4.2.1. Algoritmo de carga de archivos RINEX (cssRinex.vb)

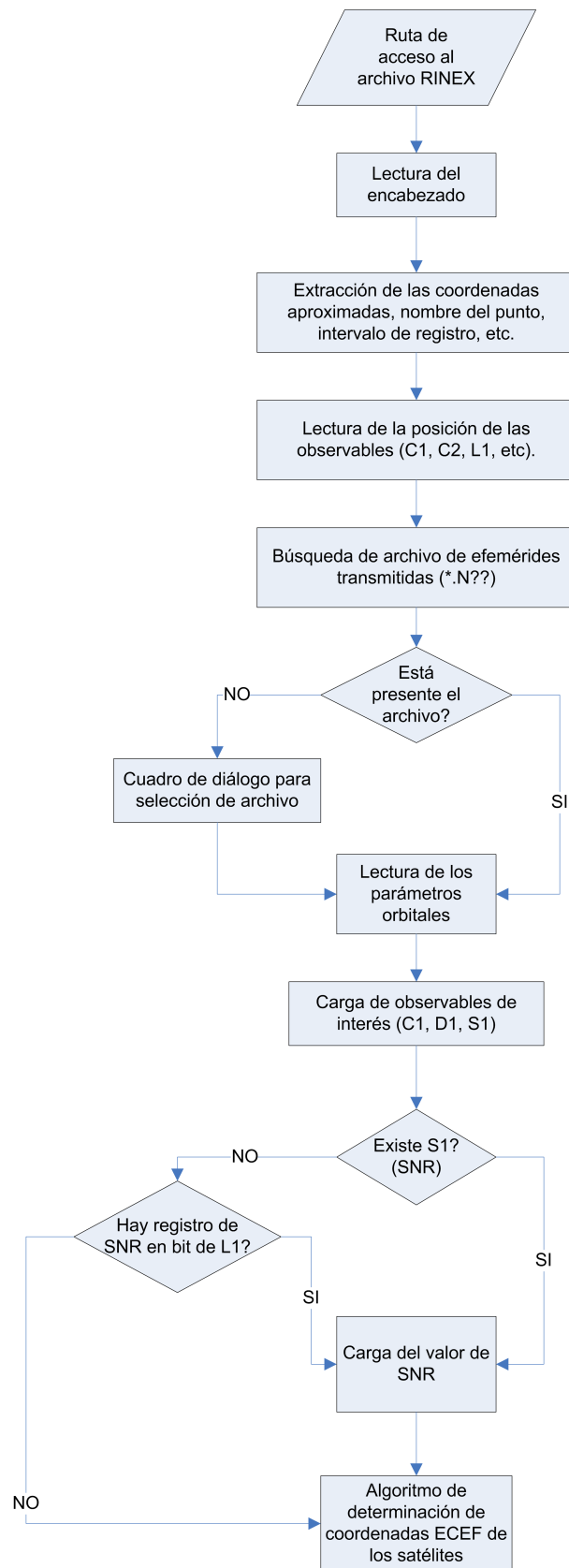


Figura 4.2: Diagrama de flujo para el algoritmo de carga de archivos RINEX.

4.2.2. Algoritmo de determinación del satélite de referencia (cssRefSat.vb)

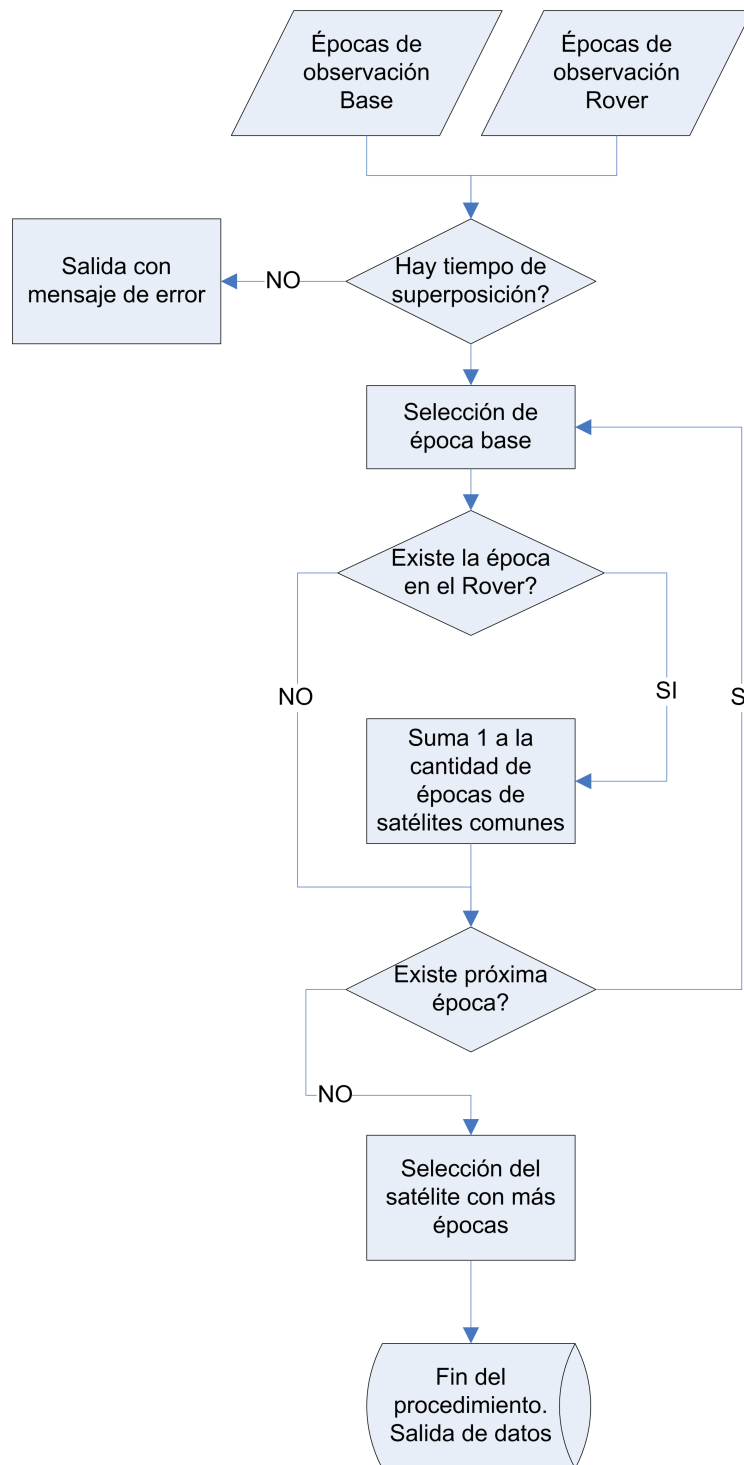


Figura 4.3: Diagrama de flujo para el algoritmo de determinación del satélite de referencia.

4.2.3. Algoritmo de procesamiento de vectores (cssDiferenciar.vb)

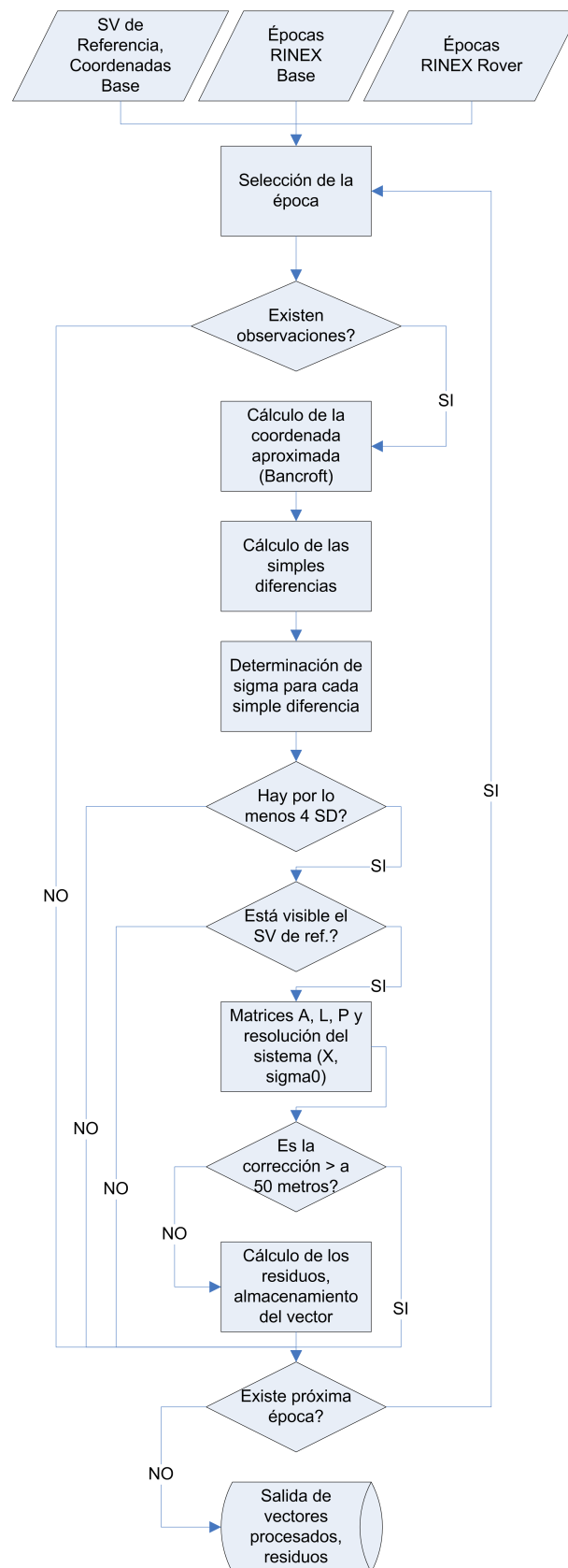


Figura 4.4: Diagrama de flujo para el algoritmo de procesamiento de vectores.

4.2.4. Algoritmo de test de bondad de ajuste (cssAjustar.vb)

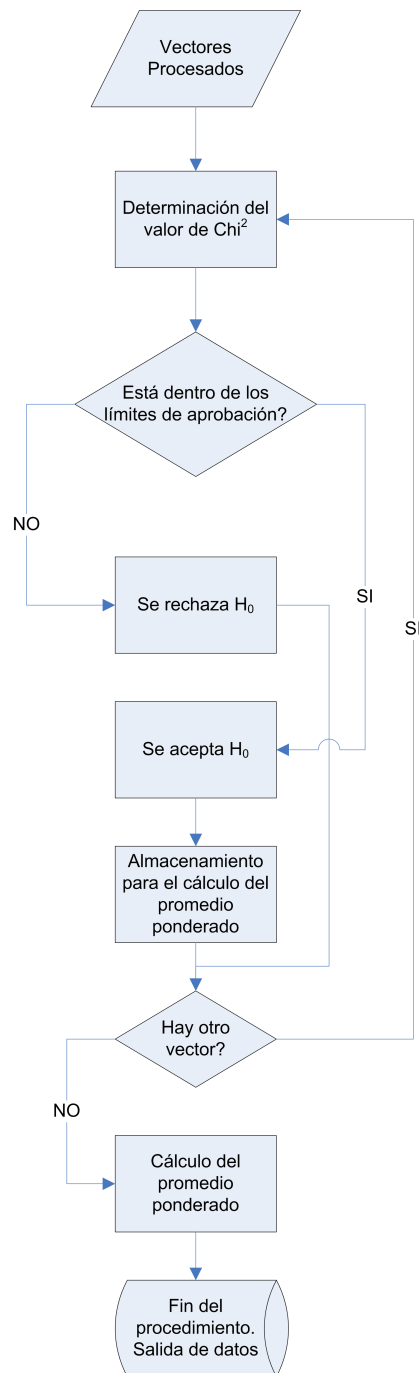


Figura 4.5: Diagrama de flujo para el algoritmo de test de bondad de ajuste.

Es pertinente aclarar el que cálculo del promedio ponderado en la etapa de test de bondad de ajuste se realiza únicamente con el objetivo de comparar resultados, siendo el mismo invisible para el usuario de la aplicación.

4.2.5. Algoritmo de filtrado por 3 sigma (cssAjustar.vb)

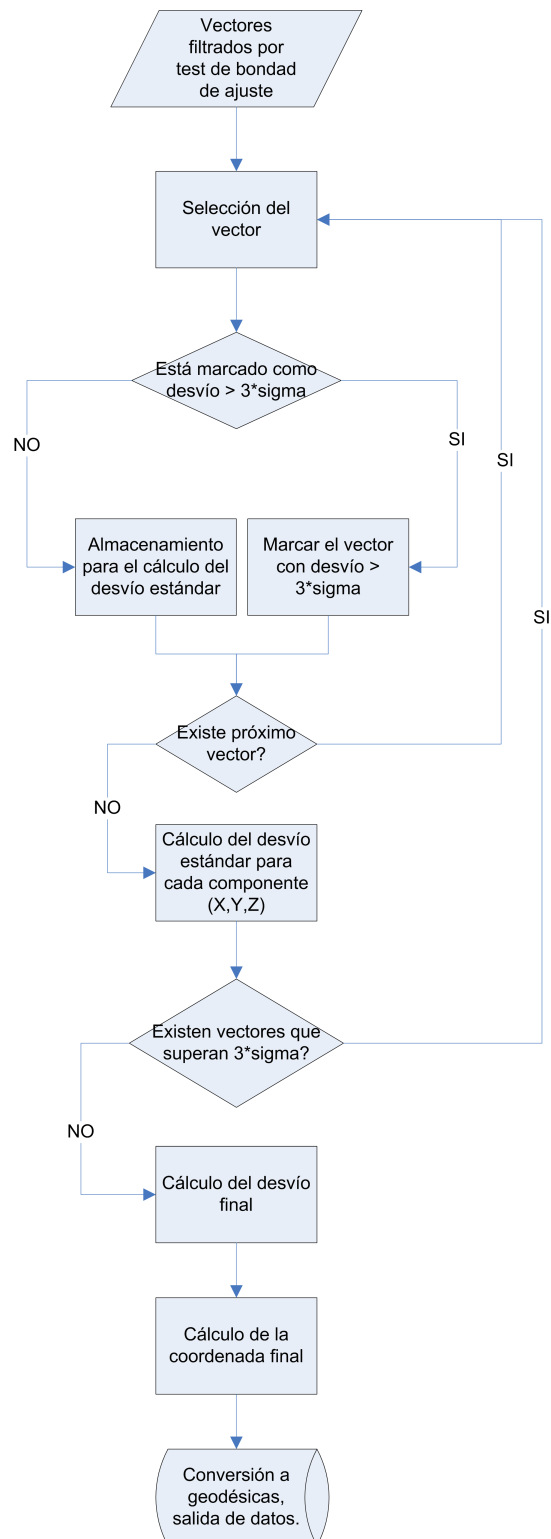


Figura 4.6: Diagrama de flujo para el algoritmo de filtrado por 3 sigma.

Existen algoritmos que se han programado o desarrollado para la presente aplicación que escapan al contenido del presente trabajo. Los mismos se realizaron con el objetivo de brindar acceso a información interna de cálculo o simplemente para facilitar el análisis de los datos obtenidos. Dentro de estos algoritmos se encuentran la conversión de sistema cartesiano geocéntrico a coordenadas geodésicas, la proyección de coordenadas geodésicas a coordenadas sobre una faja Gauss-Krüger arbitraria sobre un meridiano de tangencia central a los puntos observados y la exportación a formato CSV¹ de todas las anteriores. Además, se encuentran entre estos algoritmos, la exportación de residuos de dobles diferencias en diversos formatos que permiten la graficación utilizando diferentes herramientas externas, por ejemplo *Generic Mapping Tools* (GMT).

Dichos algoritmos o procedimientos, se encuentran en clases separadas o simplemente dentro de la misma aplicación desarrollada y no fueron materia de análisis ni explicación alguna. El código fuente se encuentra a disposición del lector en la versión digital adjunta a este trabajo.

¹Del inglés, *comma separated values*.

Capítulo 5

Resultados y análisis

Para poner a prueba los algoritmos desarrollados, se debieron realizar comparaciones utilizando únicamente código C/A, contra coordenadas previamente conocidas. En la sede **Las Heras** de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, existe una micro red geodésica de 6 vértices sobre los que se realizan habitualmente observaciones GPS durante los cursos de la materia geodesia II. Estos vértices se encuentran materializados con pilares de hormigón, sobre los que es posible acoplar, mediante una rosca estándar de 5/8", las antenas GPS correspondientes. La buena visibilidad del cielo y fortaleza de las meterializaciones, convierten a esta red en una candidata ideal para realizar la tarea mencionada.

Para ello, se utilizaron los receptores GPS simple frecuencia marca *Thales* del departamento de agrimensura y las estaciones pertenecientes a la red argentina de monitoreo satelital continuo (RAMSAC) IGM1 y MA02.

Cada comparación incluyó la obtención de una coordenada utilizando los receptores simple frecuencia. Adicionalmente, se utilizaron también receptores de bajo costo marca *GlobalSat* modelo ET-332 y un receptor *Trimble* modelo AceII. Una vez procesados los vectores, se graficaron los residuos de dobles diferencias para cada época de medición.

5.1. Descripción de la micro red geodésica

La micro red consiste de 6 vértices ubicados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires cita en avenida Las Heras 2214, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Todos ellos cuentan con sistema de centración forzosa por medio de roscas de 5/8 verticalizadas sobre pilares de hormigón de aproximadamente 1.5 metros de altura. De los 6 vértices, 5 se encuentran en la terraza y 1 en la playa de estacionamiento. Este último fue descartado como vértice factible para realizar mediciones por presentar problemas de visibilidad de satélites.

El vértice FI00 sirvió durante los años 2001 a 2005 como estación GPS permanente y cuenta en la actualidad con un vástago metálico que permite adaptar la rosca hembra del pilar a otra macho (también de 5/8"). El resto de los pilares cuenta con roscas hembra.

5.1.1. Ubicación y vértices de la micro red geodésica



Figura 5.1: Imagen satelital de Google Earth mostrando la ubicación de los vértices (utilizados) en el edificio.



Figura 5.2: Fotografía del vértice geodésico FI00.



Figura 5.3: Vista elevada de FI04.

5.2. Metodología utilizada

De modo de realizar las comparaciones, se pautó la metodología a utilizar:

- Primero, se midieron nuevamente 5 de los 6 vértices de modo de conseguir coordenadas en el nuevo marco de referencia geodésico nacional, POSGAR 2007 dado que las coordenadas de la micro red se encontraban en el marco anterior, POSGAR 94.
- Utilizando software comercial, se procesaron los vectores –utilizando observable de fase– medidos con dos receptores marca *Thales*, modelo Promark 3.
- Estas mismas observaciones (en formato RINEX) serían luego utilizadas para procesar los mismos vectores utilizando los algoritmos desarrollados. Es importante destacar que no debió hacerse ninguna modificación a los archivos obtenidos, ya que el algoritmo de lectura de archivos RINEX simplemente ignora la observación de fase.
- Los procesamientos fueron realizados de forma tal de obtener un procesamiento contra MA02 e IGM1 y otro contra un punto local, de modo de obtener 3 vectores de diferente longitud. Las estaciones MA02 e IGM1 pertenecen a la red de estaciones GNSS permanentes RAMSAC¹.

¹Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo: <http://www.ign.gob.ar>

- En forma paralela, se realizaron algunas mediciones utilizando receptores *GlobalSat* modelo ET-332 y *Trimble* modelo AceII.

Los resultados de los procesamientos fueron volcados a un sistema de información geográfica, en este caso utilizando el software ESRI ArcGIS. Esta metodología soluciona muchos inconvenientes, que de otra forma requerirían de un tratamiento especial. Entre otros, ArcGIS permite proyectar en pantalla coordenadas geodésicas. Además, es posible realizar un análisis tanto espacial como temporal de las coordenadas y puntos obtenidos, incorporando *shapes* individuales para cada procesamiento. Para todos los casos, se utilizaron las salidas gráficas de ArcGIS de modo de representar las diferentes mediciones. Cabe destacar que, a pesar de haberse utilizado ArcGIS, se incluyó en el software de procesamiento un módulo de proyección de coordenadas geodésicas a coordenadas planas (Gauss-Krüger).

5.3. Remedición de la micro red geodésica

Realizando observaciones durante los días 276, 279, 297, 301 y 302, se procesaron las observaciones obtenidas de modo de obtener las coordenadas geodésicas necesarias para contrastar los post-procesos realizados únicamente con código C/A. Para el procesamiento, se utilizó el software comercial *Ashtech Solutions*. Las estaciones MA02 e IGM1 fueron las seleccionadas para la vinculación de los puntos de la micro red al marco de referencia geodésico nacional POSGAR 2007. Las mismas se encuentran aproximadamente a una distancia de 4.3 km y 2 km respectivamente, de la sede Las Heras de la facultad de ingeniería. El ajuste de los vectores observados, de modo de obtener la mejor coordenada posible para cada punto, fue realizado utilizando el mismo software.

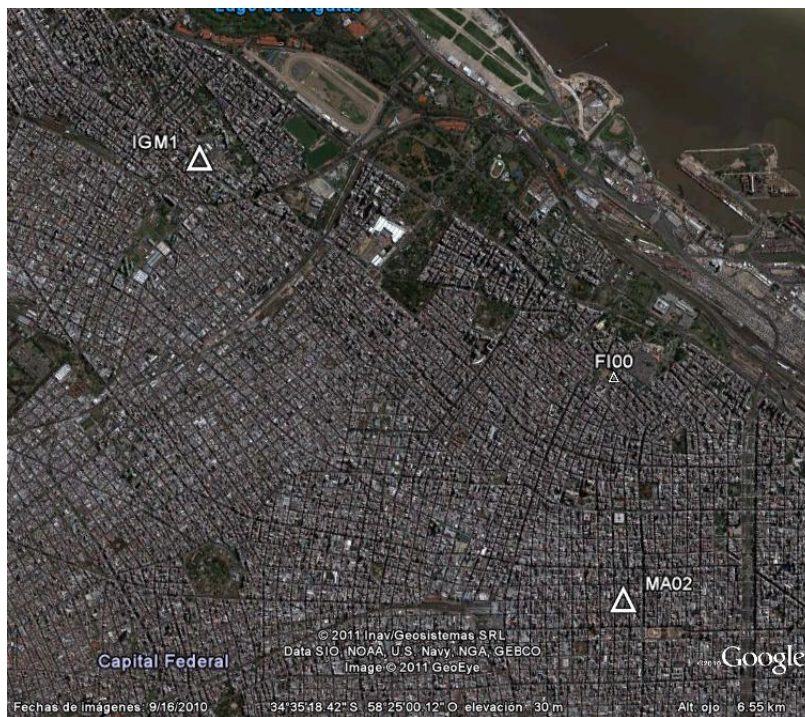


Figura 5.4: Ubicación de las estaciones permanentes IGM1 y MA02.

A continuación se presenta una tabla con las coordenadas obtenidas de dicho procesamiento y posterior ajuste.

Vértice	Latitud			σ lat [m]	Longitud			σ lon [m]	Al. e. [m]	σ alt. [m]
FI00	-34°	35'	18.7754"	0.004	-58°	23'	46.8276"	0.004	67.845	0.005
FI04	-34°	35'	17.9663"	0.004	-58°	23'	47.9435"	0.005	59.477	0.005
FI05	-34°	35'	18.5822"	0.004	-58°	23'	48.6674"	0.004	59.486	0.005
FI06	-34°	35'	19.3588"	0.005	-58°	23'	46.2100"	0.005	59.608	0.005
FI07	-34°	35'	19.9750"	0.004	-58°	23'	46.9342"	0.004	59.542	0.005

Cuadro 5.1: Coordenadas de la micro red geodésica expresadas en el marco POSGAR 2007.

La información de las mediciones realizadas sobre los vértices (equipos de medición, información sobre MA02 e IGM1, etc.), podrá encontrarse en el anexo A de este trabajo.

5.4. Comprobación del modelo estocástico

Antes de realizar comparación alguna, se debió adoptar alguno de los modelos estocásticos mencionados durante el capítulo 3. Para ello, se compararon los resultados de diversas mediciones de modo de hallar el modelo que permitiera que las compensaciones de cada época no sufrieran deformaciones luego del ajuste. Leick denomina a esto una “correcta selección del modelo estocástico”.

Para las observaciones realizadas, se procesaron los vectores utilizando ambos modelos estocásticos. Luego de diversas pruebas, se observó que el modelo propuesto por Le genera resultados que no superan el test de bondad de ajuste². Esto implica, tal como lo expresa Leick, que existe algún problema con el modelo determinístico o el modelo estocástico. Luego de procesar con el modelo propuesto por Leick, se observó que la mayoría de los resultados sí superan satisfactoriamente el test de bondad de ajuste.

El la figura 5.5 puede observarse lo descripto anteriormente. Los puntos procesados utilizando el modelo propuesto por Le presentan una notable diferencia frente a los procesados según el modelo propuesto por Leick. Esta diferencia se manifiesta como una rotación y aparente cambio de escala entre ambos procesamientos. Es importante recordar que el indicio más claro de un problema con el modelo estocástico, se evidencia al obtener el valor de σ_0 *a posteriori*. La compensación realizada utilizando el modelo propuesto por Le no supera el test de bondad de ajuste, por lo que se decidió finalmente utilizar para todos los procesamientos el modelo propuesto por Leick.

²Ver sección 3.3 p. 22

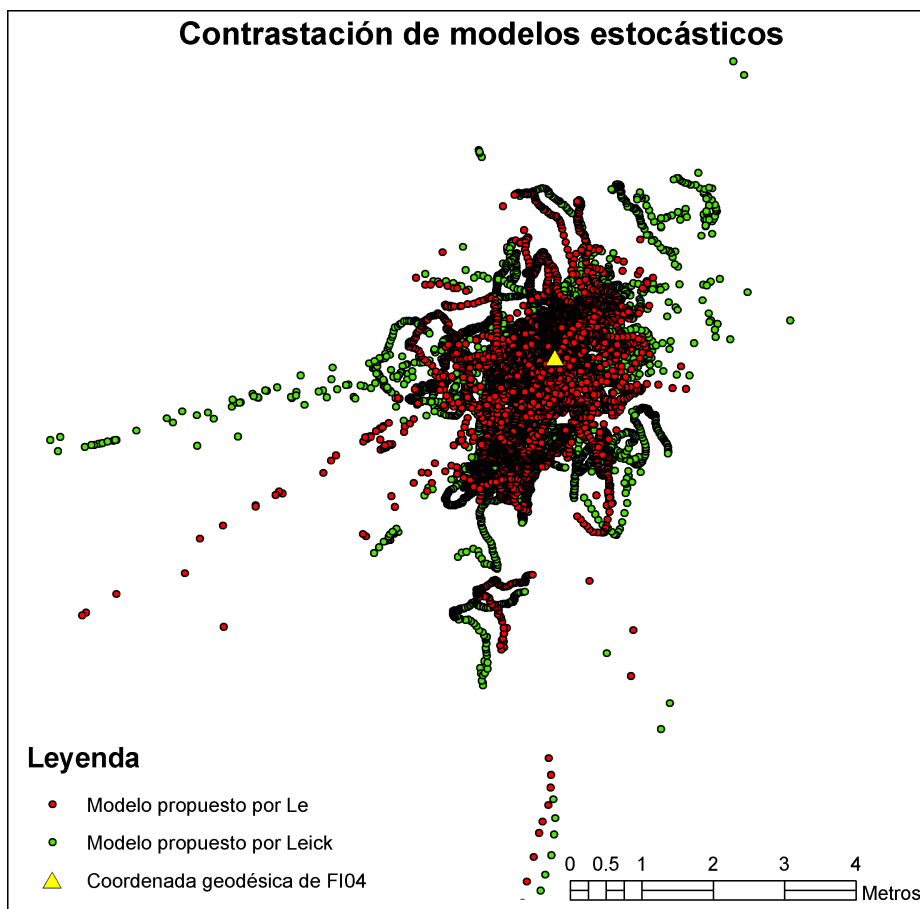


Figura 5.5: Contrastación de los modelos estocásticos propuestos.

El procesamiento exhibido en la figura 5.5 fue realizado sobre el vértice FI04 procesando contra la estación RAMSAC IGM1. Cada punto rojo o verde representa una época de medición procesada con el modelo propuesto por Leick (verde) o por Le (rojo). A modo ilustrativo, dado que las observaciones procesadas según Le no pasaron el test de bondad de ajuste, se han dejado todas las épocas de medición sin importar si éstas superaron o no el test estadístico antes mencionado.

5.5. Contrastación de los algoritmos desarrollados

Durante esta contrastación, se pusieron a prueba todos los algoritmos desarrollados, tanto los de carga de datos como los de procesamiento y ajuste. Fue también en esta etapa donde se descubrieron y corrigieron lo que en programación se denominan *bugs*³. Dicho término hace referencia a errores de programación no contemplados durante el momento de desarrollo, pero que aparecen en la etapa de producción, no permitiendo finalizar un procesamiento determinado.

Además, los modelos determinísticos y estocásticos también serían puestos a prueba, dado que al realizarse observaciones sobre puntos de coordenadas conocidas fue posible determinarse

³En inglés, *bug* significa bicho. El término se remonta a la época en la que circuitos mecánicos convivían con circuitos eléctricos para conformar la lógica de operación. Cuando literalmente un bicho trababa alguno de los mecanismos, se decía que se debía hacer un *debugging* de la máquina.

el **error** de cada observación realizada en código.

A los efectos de aclarar el párrafo anterior, es posible afirmar que se han podido determinar los errores de los procesamientos, dado que las coordenadas utilizadas para comparar los resultados se encuentran dentro de los 5 mm de precisión. Dicha calidad puede considerarse como excelente para ser utilizada como método de comparación de algoritmos que determinarán coordenadas con una precisión no mejor que de 10 centímetros.

Durante esta sección, se presentarán hechos y no conclusiones. Las conclusiones y recomendaciones podrán encontrarse en el próximo capítulo. Dado la extensa cantidad de información que implica incluir todos los datos referentes a los procesamientos en código, solamente se plasmarán algunos ejemplos de las observaciones realizadas. El lector podrá comprobar, mediante gráficos a la misma escala, las diferentes dispersiones obtenidas en distintas condiciones. En los casos que fuera posible, se presentarán los procesamientos utilizando una estación cercana (dentro de los 100 metros) y otra lejana (de más de 4 kilómetros). Toda la información completa, tanto gráficos como resultados, podrá encontrarse en la versión digital adjunta a este trabajo.

5.5.1. Coordenadas obtenidas en código: análisis espacial

En esta sección se presentarán los gráficos extraídos de ArcGIS en donde se detallarán las estaciones que han servido de bases para los procesamientos y las coordenadas de puntos obtenidas, tanto filtradas como no filtradas. Como se vio durante el desarrollo del capítulo 4, luego de diferenciadas y calculadas todas las épocas y posteriormente al filtro de bondad de ajuste, se realizó un filtro de 3σ . Dicho filtro tiene el objetivo de eliminar cualquier observación que sobrepase el 3 veces el desvío esperado.

En cada gráfico de procesamiento de observaciones, podrán observarse 3 círculos concéntricos centrados en la coordenada geodésica. Los mismos representan radios de 0.5, 1.0 y 1.5 metros. El objetivo de estos es permitir observar rápidamente dentro de qué radio se encuentran las observaciones que han pasado los tests de bondad de ajuste y de 3σ .

Vértice FI00

A continuación se presentan 2 tablas: la primera contiene las coordenadas obtenidas mediante la técnica propuesta. En la segunda se transcriben las diferencias respecto de las coordenadas geodésicas, junto con los valores de σ para latitud, longitud y altura elipsoidal surgidos del procesamiento en código. El tiempo de observación fue de 4 horas.

Base	Vértice	Latitud			Longitud			Alt. [m]
IGM1	FI00	-34°	35'	18.779"	-58°	23'	46.824"	67.71
MA02	FI00	-34°	35'	18.775"	-58°	23'	46.825"	68.13

dif. lat. [m]	dif. lon. [m]	dif. alt. [m]	σ lat. [m]	σ lon. [m]	σ alt. [m]
-0.097	0.214	-0.044	0.738	0.365	0.570
0.053	0.081	0.103	0.670	0.251	0.708

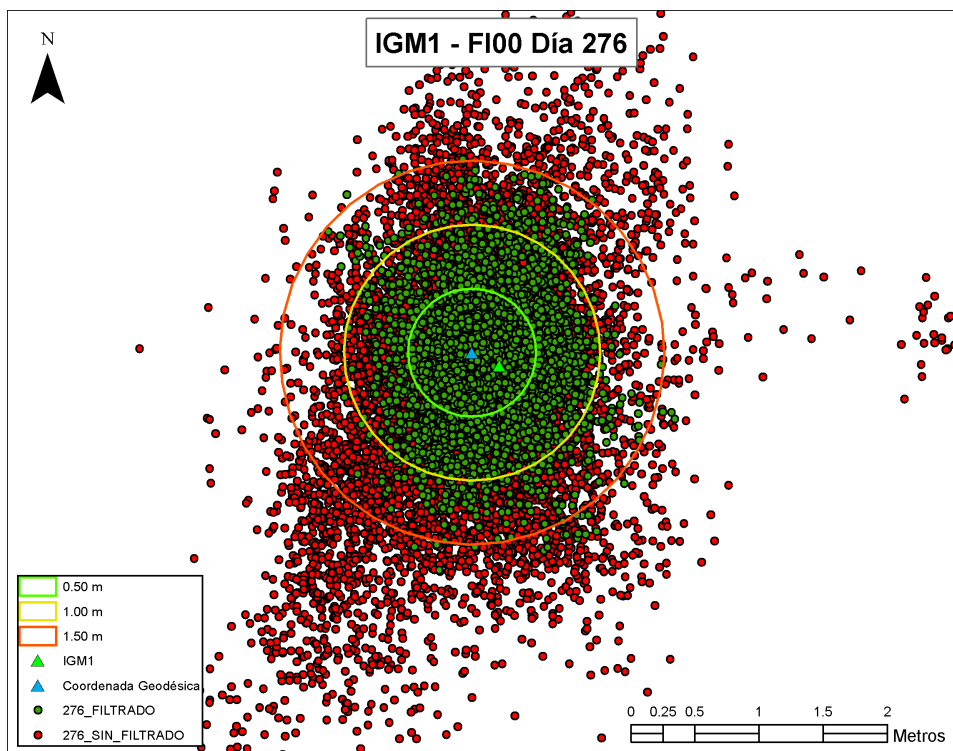


Figura 5.6: Gráfico del procesamiento de las observaciones (IGM1-FI00)

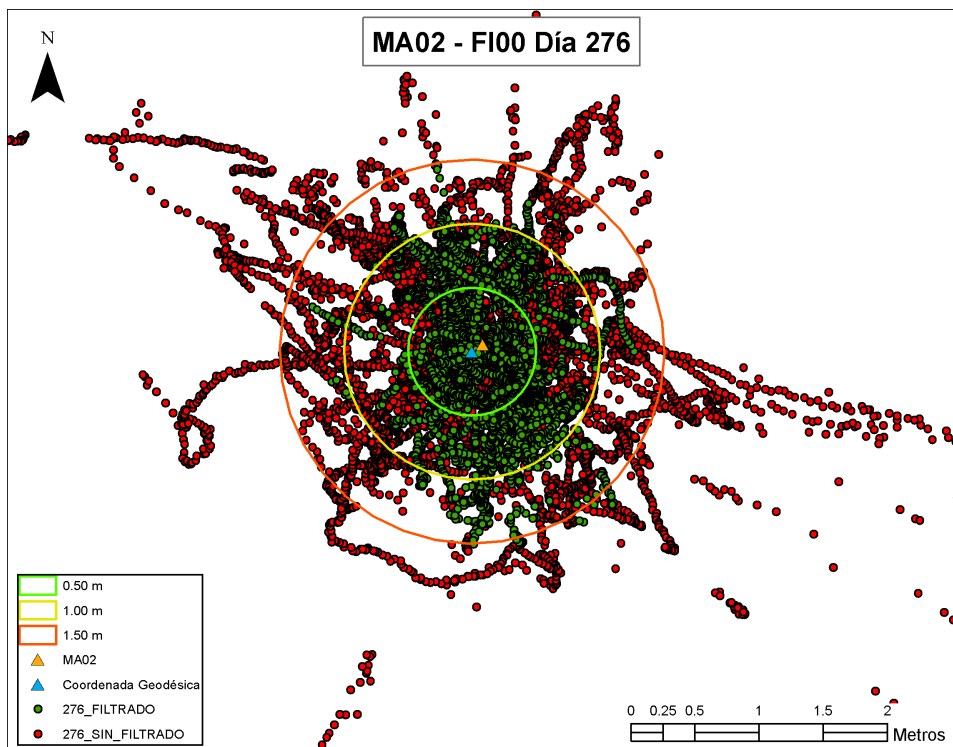


Figura 5.7: Gráfico del procesamiento de las observaciones (MA02-FI00)

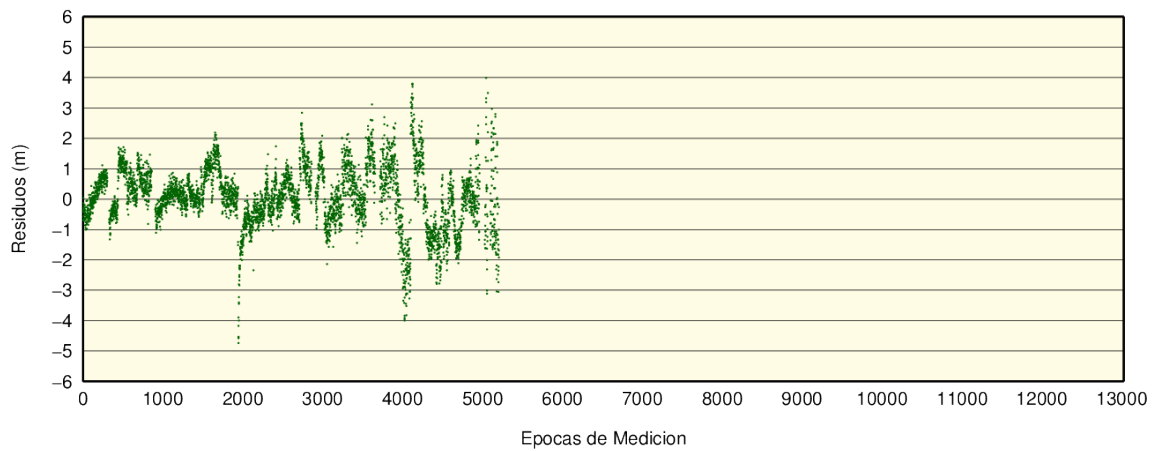
Residuos de dobles diferencias

Como método para cuantificar el resultado de un procesamiento, es posible analizar los denominados “residuos de dobles diferencias”. Dichos residuos son el resultado de la diferencia entre la matriz de observaciones L y la matriz $L' = AX$.

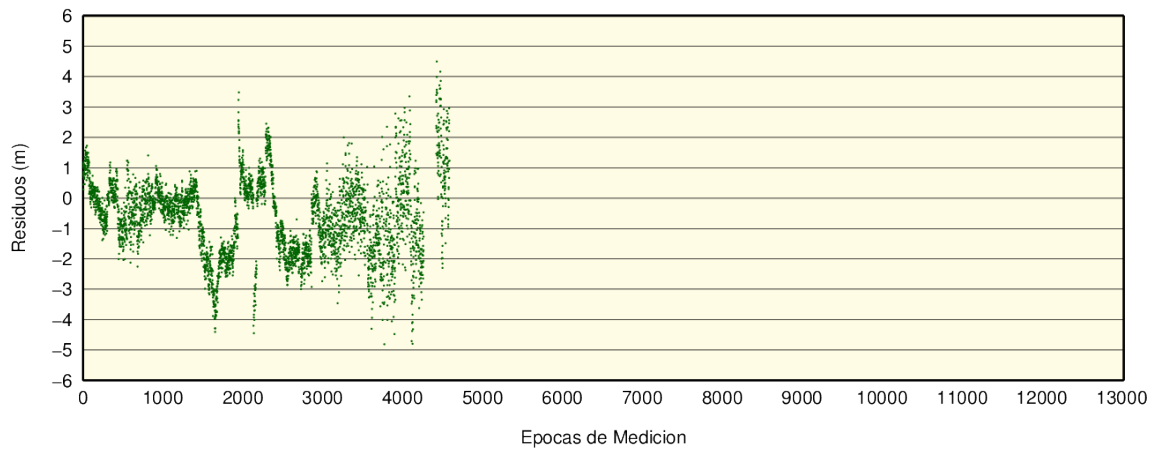
Es de esperarse que todos los residuos estén distribuidos en forma uniforme a un lado y al otro de la solución obtenida.

A continuación se presentan los gráficos de residuos de dobles diferencias para el procesamiento IGM1-FI00

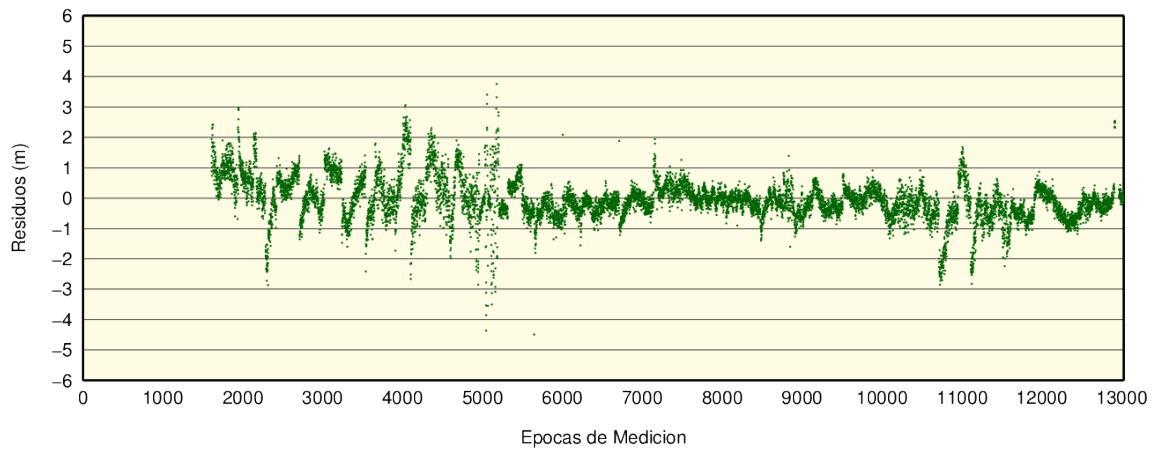
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV2)



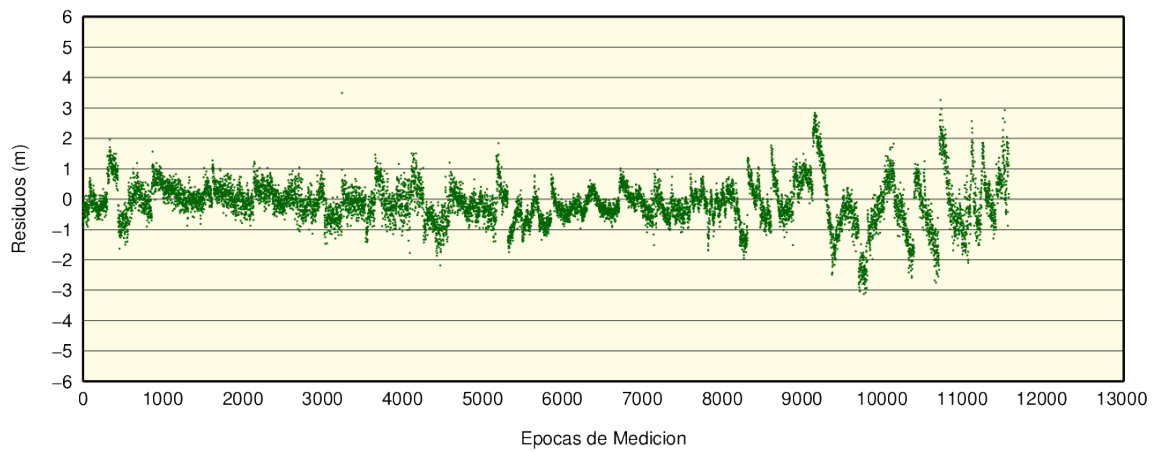
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV4)



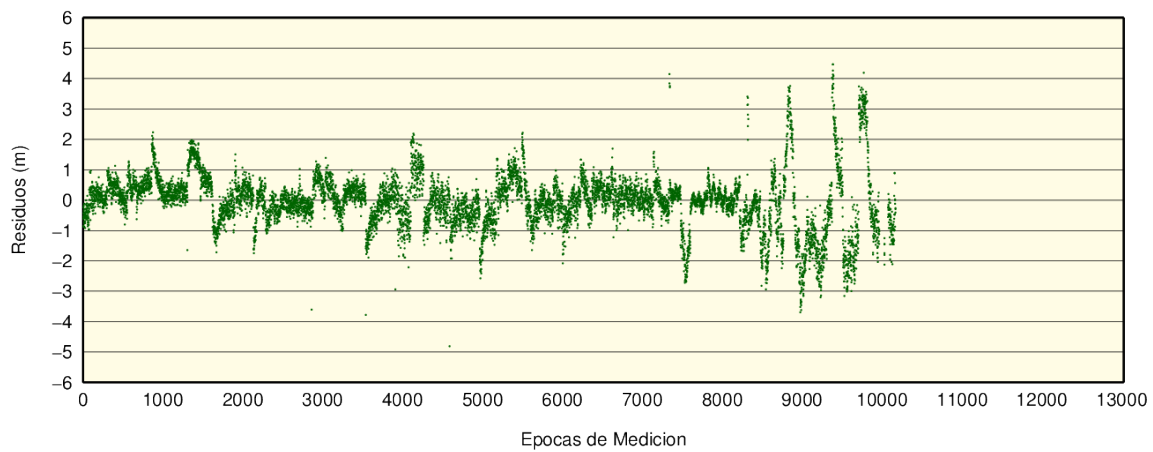
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV5)



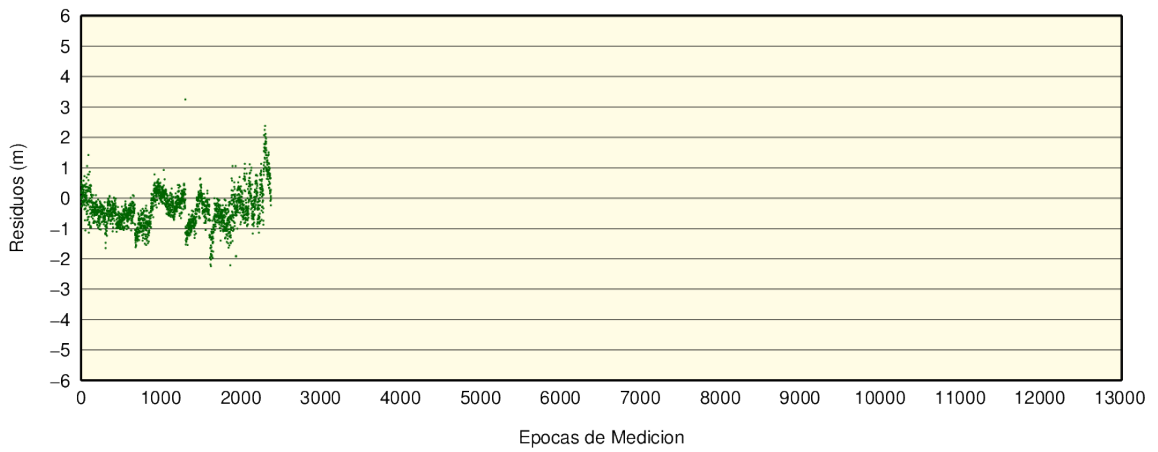
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV10)



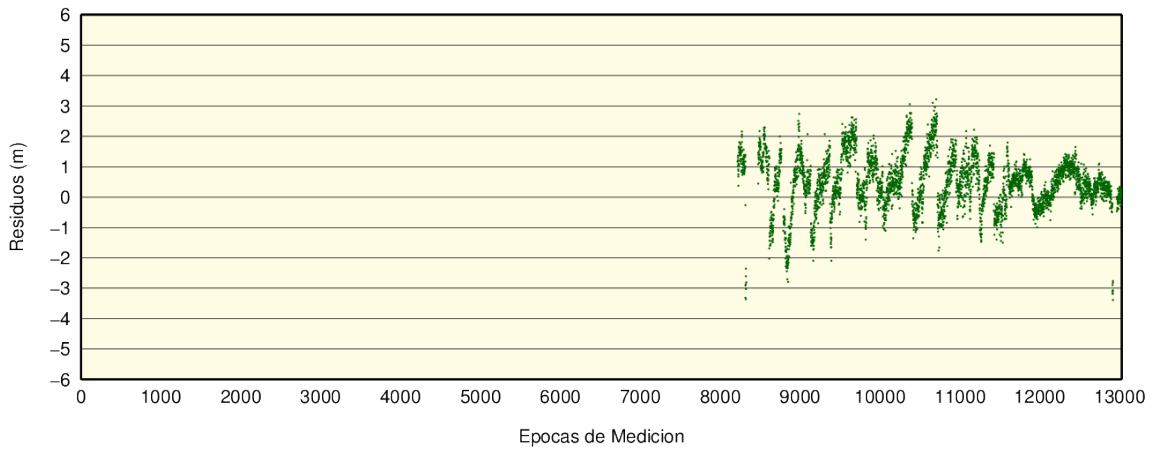
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV13)



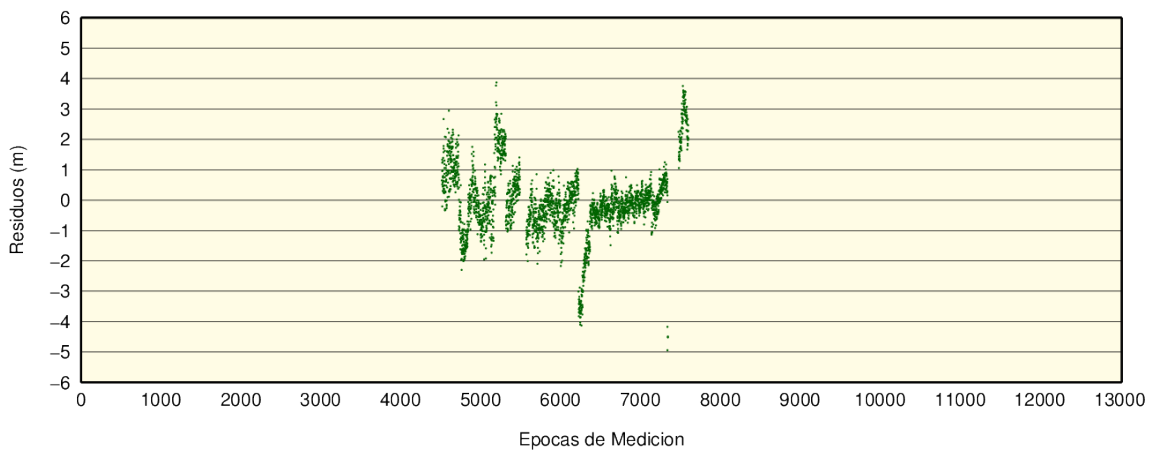
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV16)



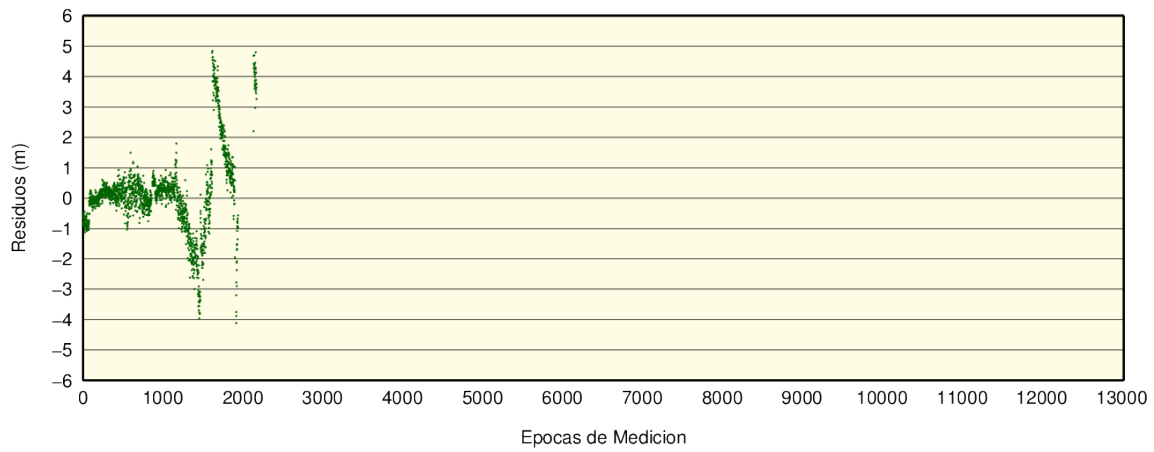
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV17)



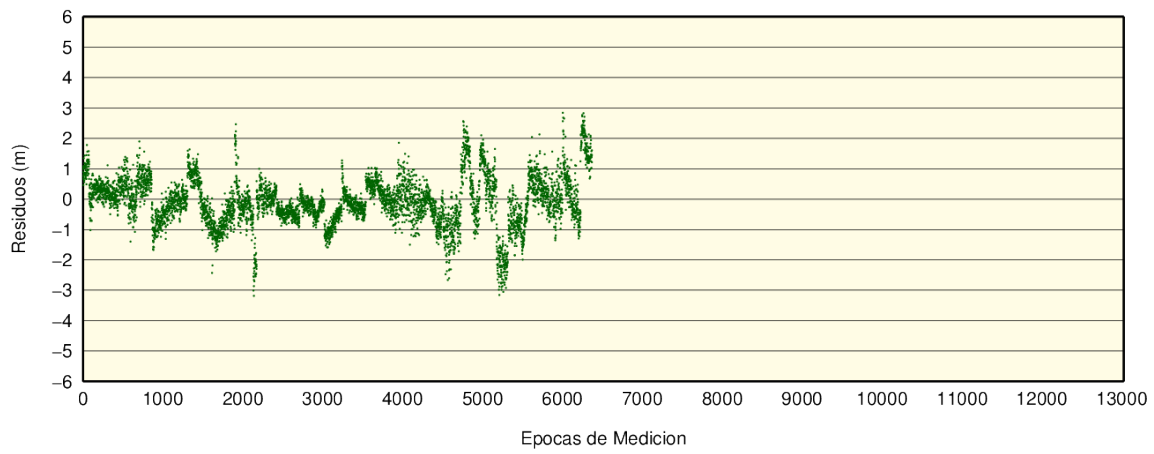
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV19)



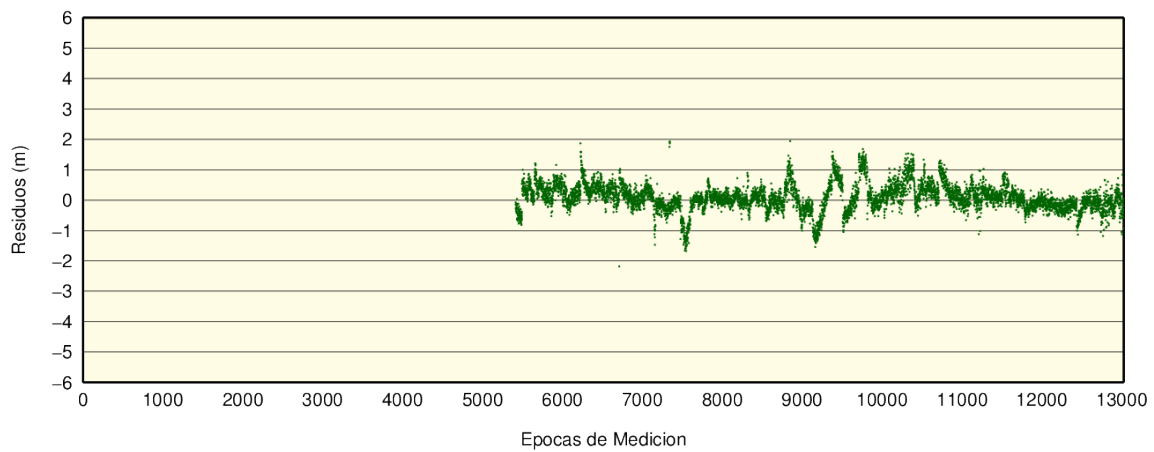
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV20)



Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV23)



Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV26)



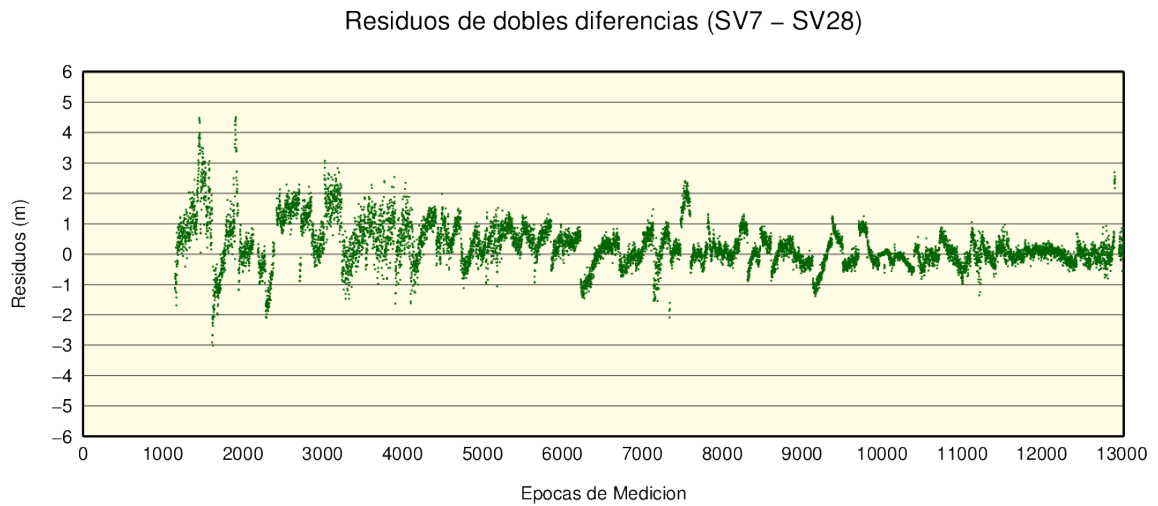
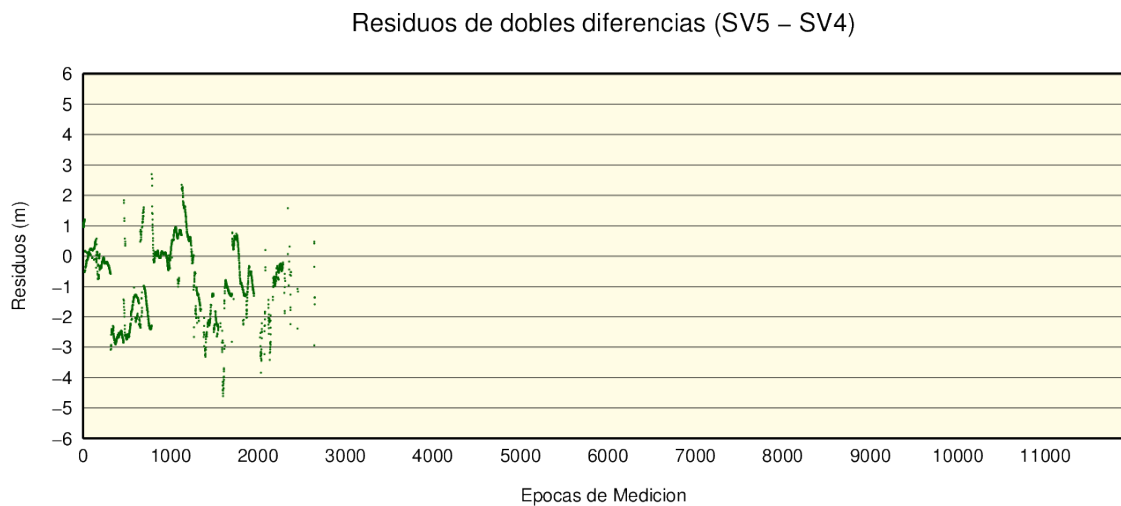
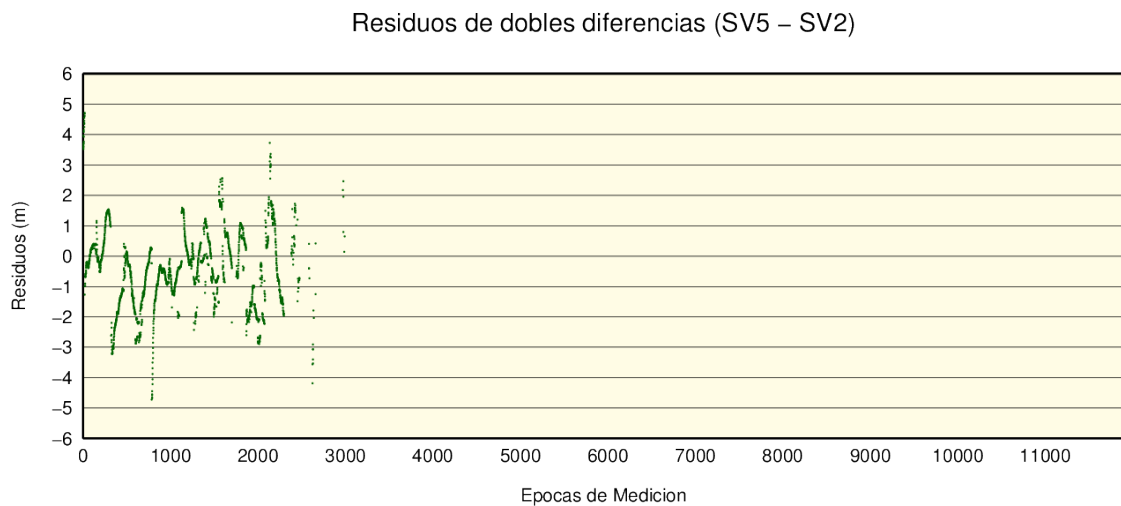
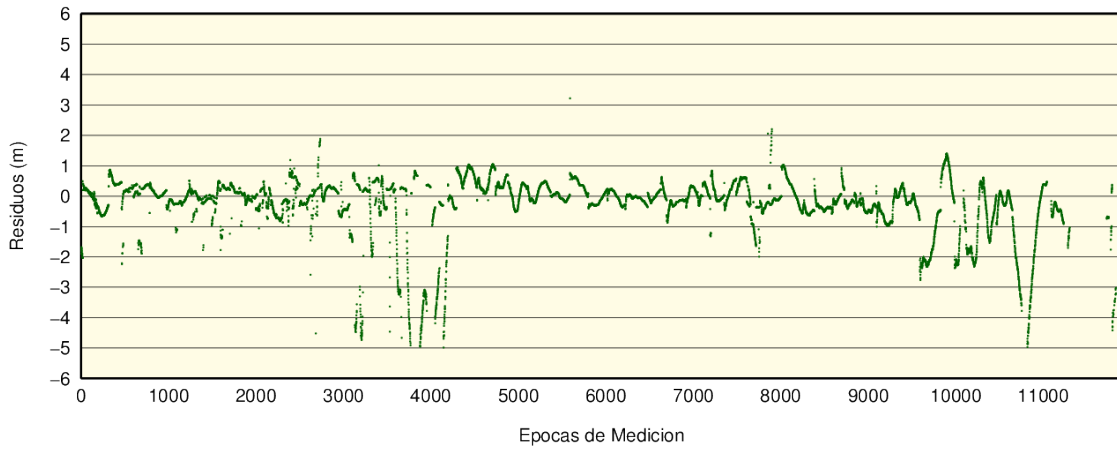


Figura 5.8: Residuos de dobles diferencias vector IGM1-FI00

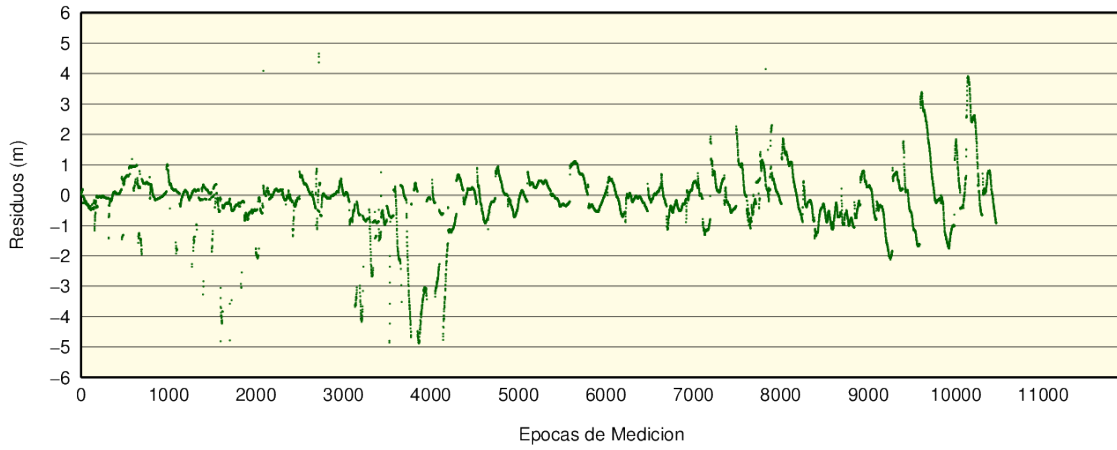
A continuación se presentan los gráficos de residuos de dobles diferencias para el procesamiento MA02-FI00.



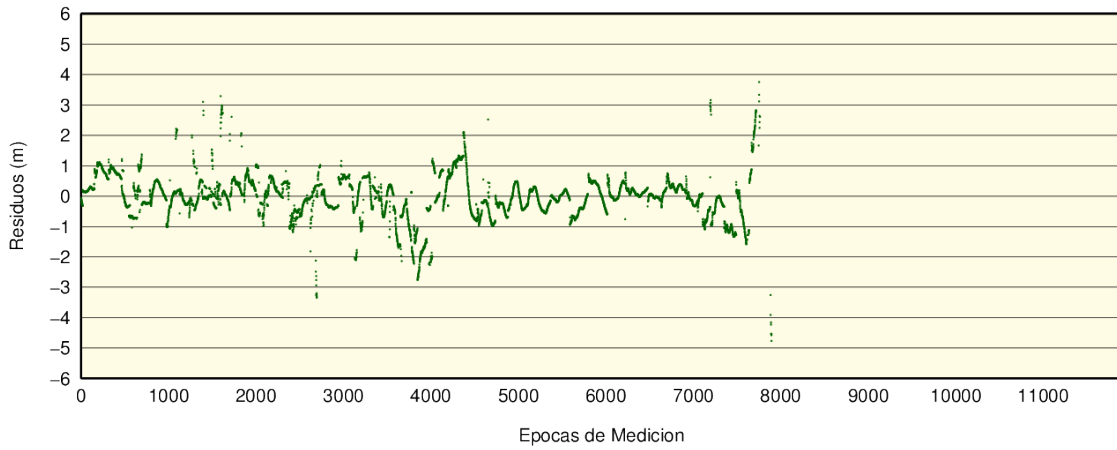
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV7)



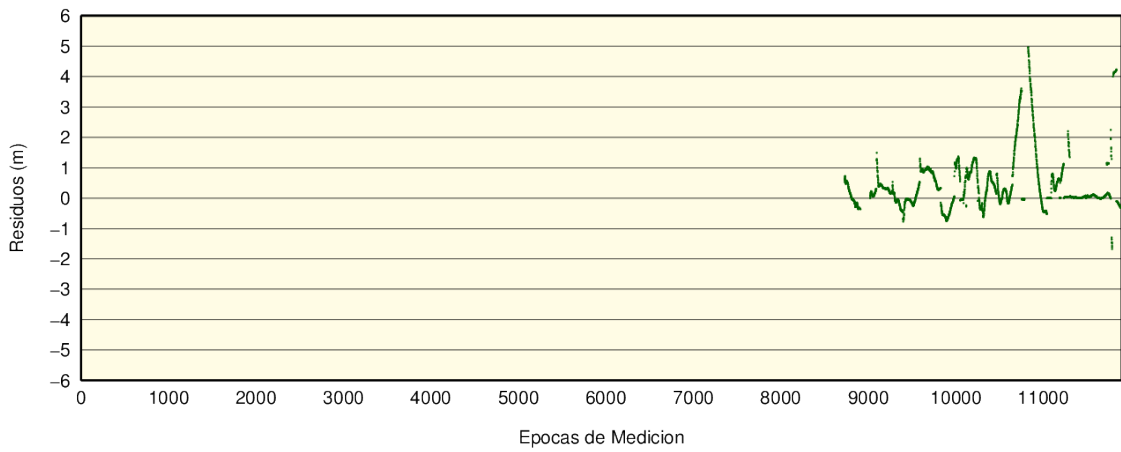
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV10)



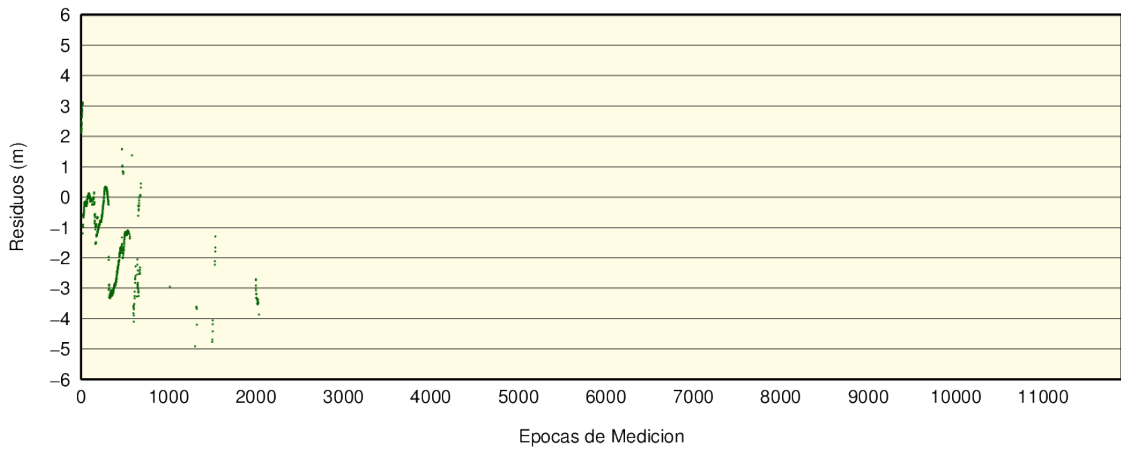
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV13)



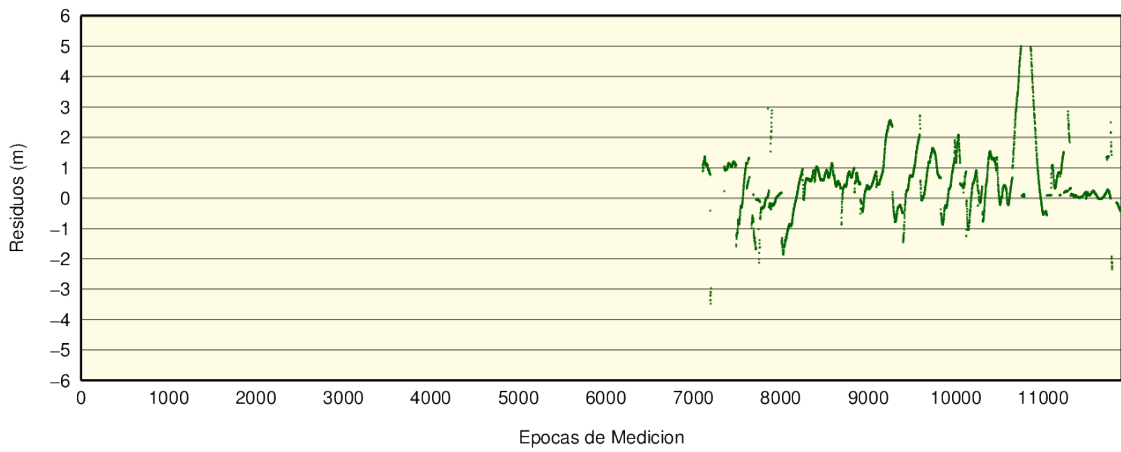
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV15)



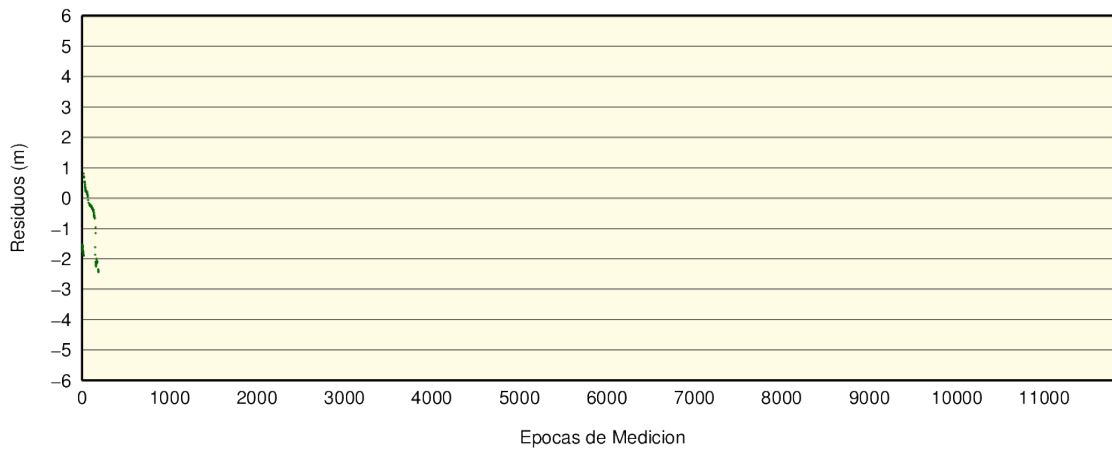
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV16)



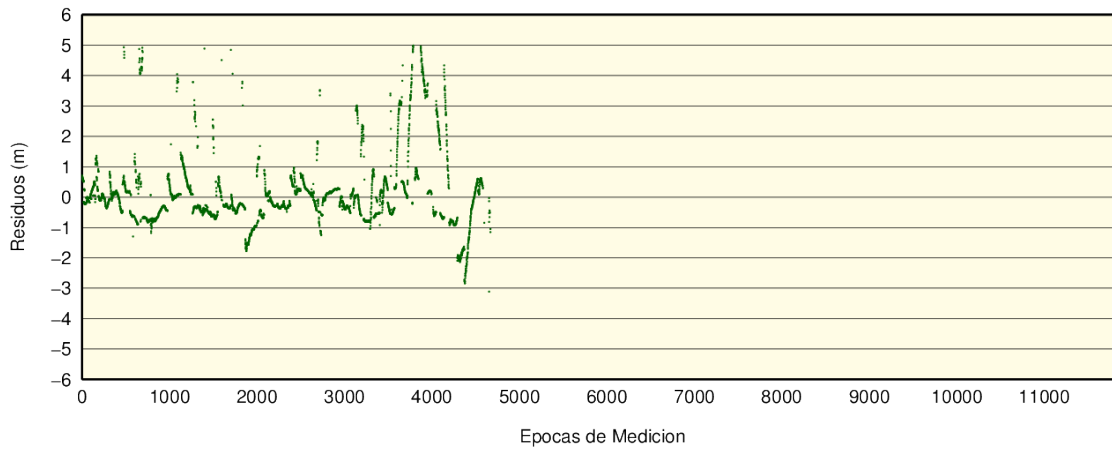
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV17)



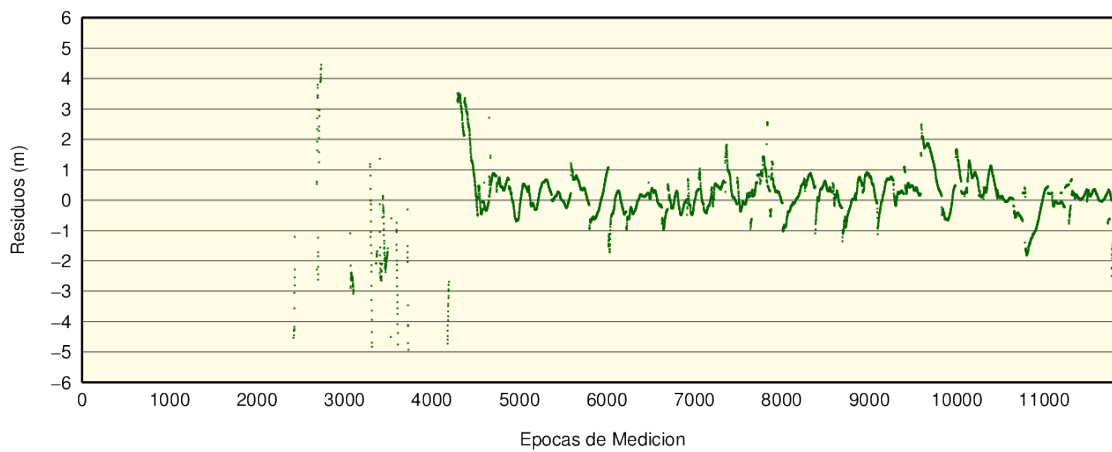
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV20)



Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV23)



Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV26)



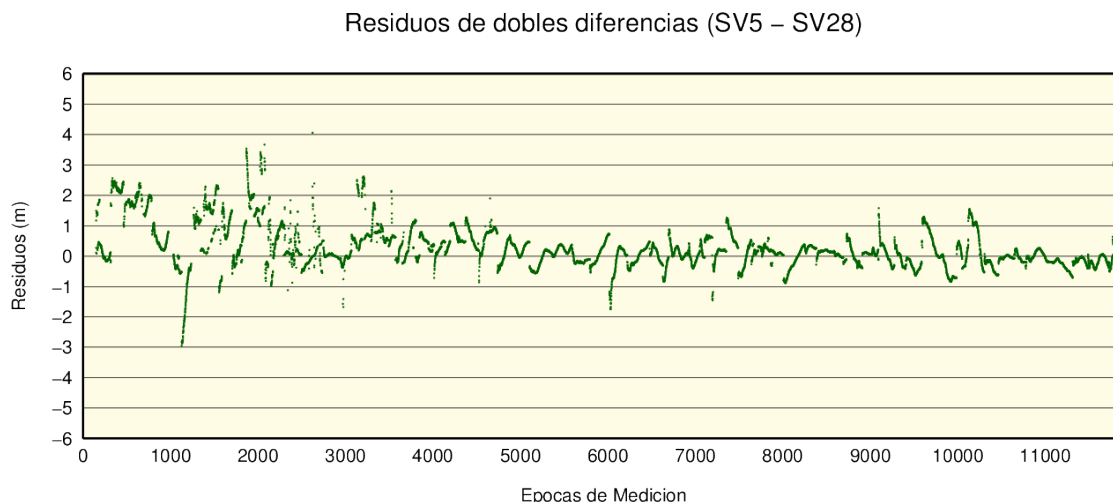


Figura 5.9: Residuos de dobles diferencias vector MA02-FI00

De los gráficos antes presentados, es posible observar la importancia de la determinación del satélite de referencia. Si el lector observa con detenimiento, podrá apreciar que en todos los gráficos –tanto para el procesamiento con IGM1 como para el procesamiento con MA02– los residuos de dobles diferencias son siempre respecto de un mismo satélite denominado de referencia. Tal como se ha expresado durante el capítulo 4, esta técnica permite la eliminación de posibles errores sistemáticos producidos durante una medición.

Estos errores sistemáticos pueden –en algunos casos– estar vinculados al satélite que se ha utilizado como referencia. Observando los gráficos de residuos de IGM1-FI00, se podrá notar que alrededor de la época 4000 es posible observar una mayor dispersión en todos los gráficos de residuos. Esto podría producirse por el paso de la señal GPS del satélite de referencia a través de un medio que haya producido una alteración de la misma.

En un análisis más detallado, podrían encontrarse otros patrones que justificarían la selección de otro satélite de referencia y posterior re-procesamiento. Es factible realizar un análisis espacial de las coordenadas obtenidas para las épocas que presentan mayor dispersión con el objetivo de realizar un estudio más acabado del origen de dicha dispersión.

Vértice FI07

Al igual que para FI00, se presentan dos tablas. El tiempo de observación fue de 2 horas.

Base	Vértice	Latitud			Longitud			Alt. [m]
IGM1	FI07	-34°	35'	19.975"	-58°	23'	46.942"	59.11
FI06	FI07	-34°	35'	19.978"	-58°	23'	46.937"	59.87

dif. lat. [m]	dif. lon. [m]	dif. alt. [m]	σ lat. [m]	σ lon. [m]	σ alt. [m]
0.003	-0.193	-0.432	0.523	0.281	0.453
-0.099	-0.076	0.332	0.557	0.458	0.518

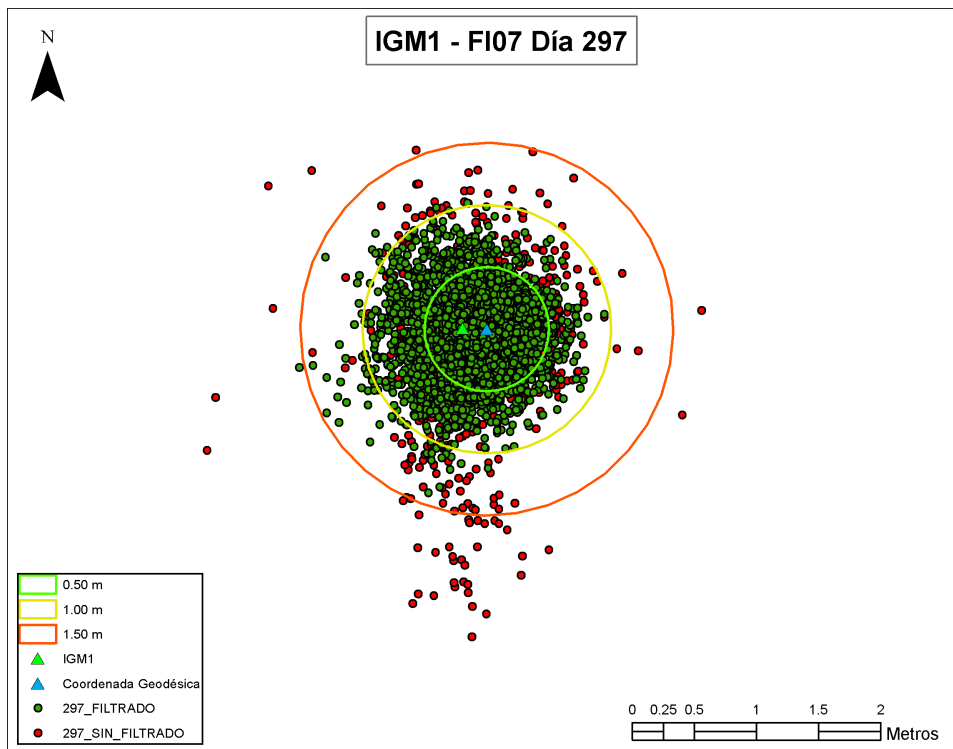


Figura 5.10: Gráfico del procesamiento de las observaciones (IGM1-FI07)

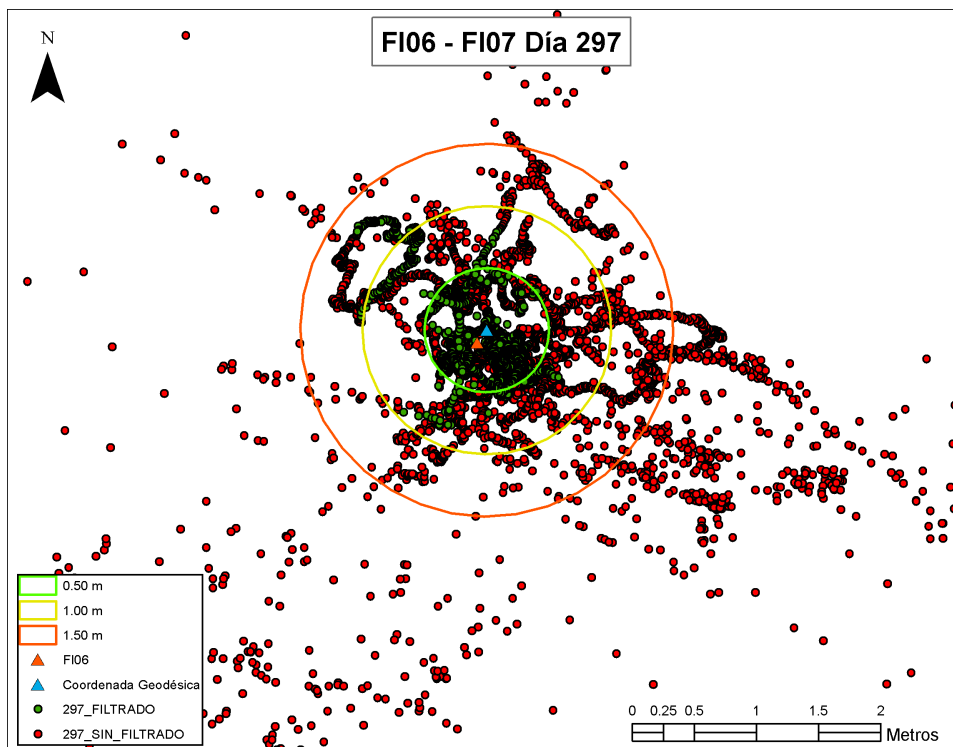
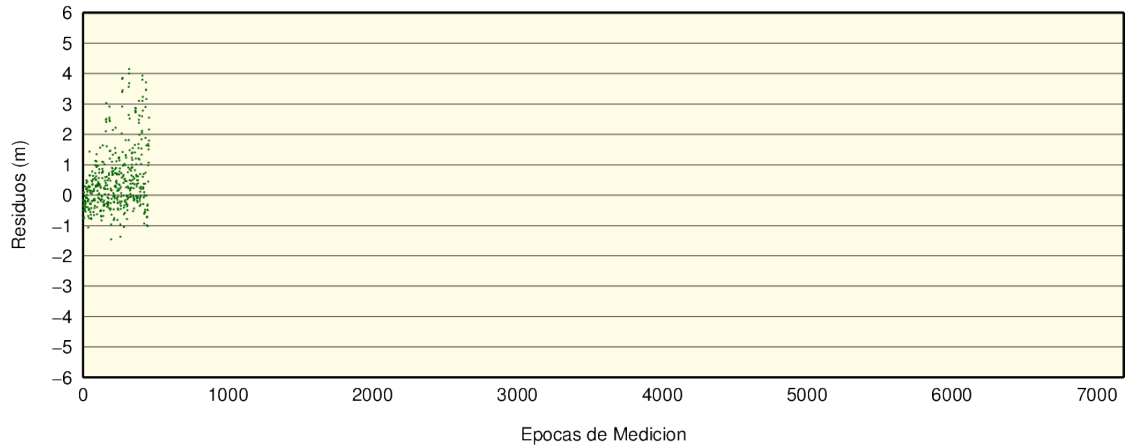


Figura 5.11: Gráfico del procesamiento de las observaciones (FI06-FI07)

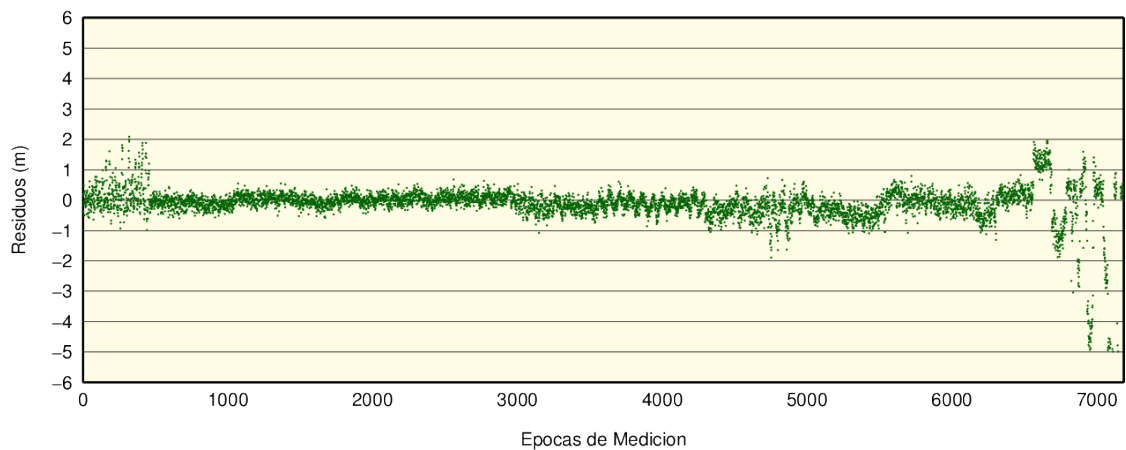
Residuos de dobles diferencias

A continuación se presentan los gráficos de residuos de dobles diferencias para el procesamiento IGM1-FI07

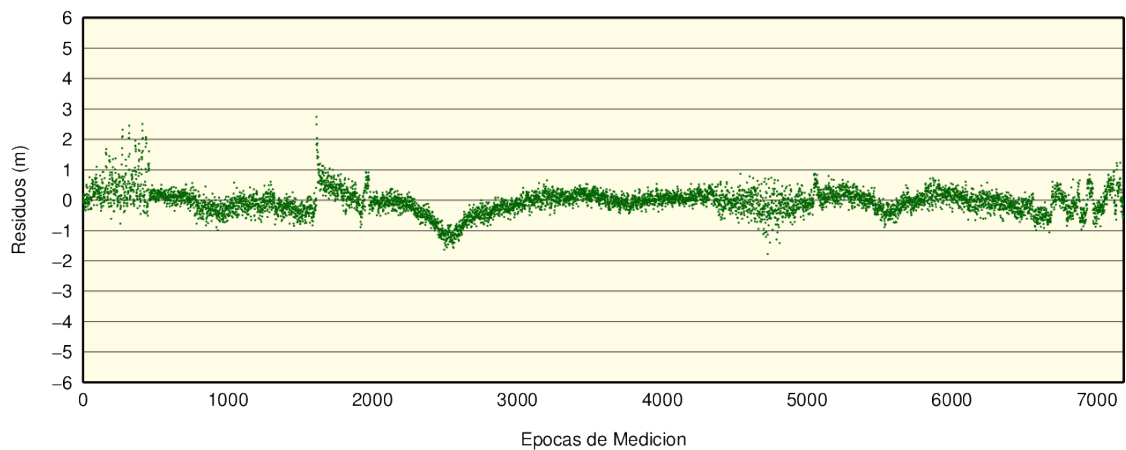
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV2)



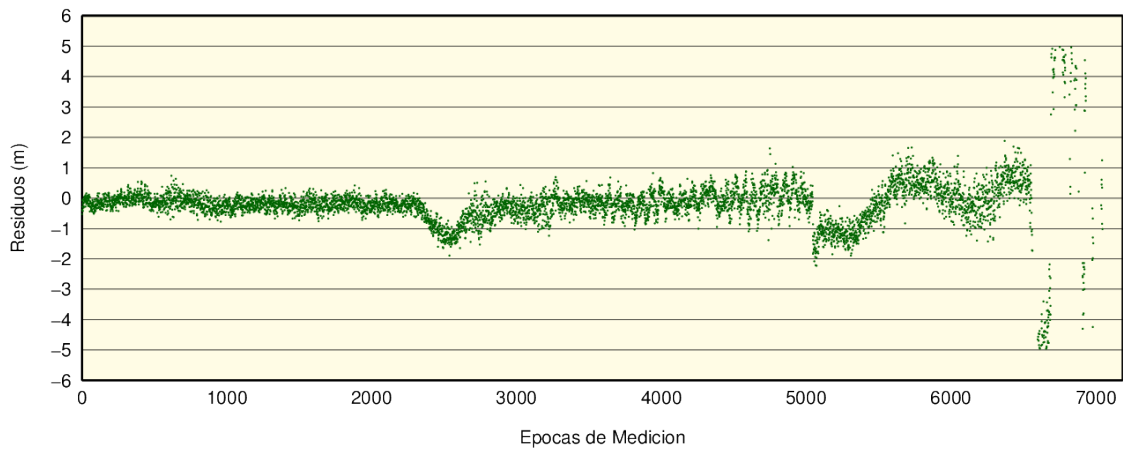
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV7)



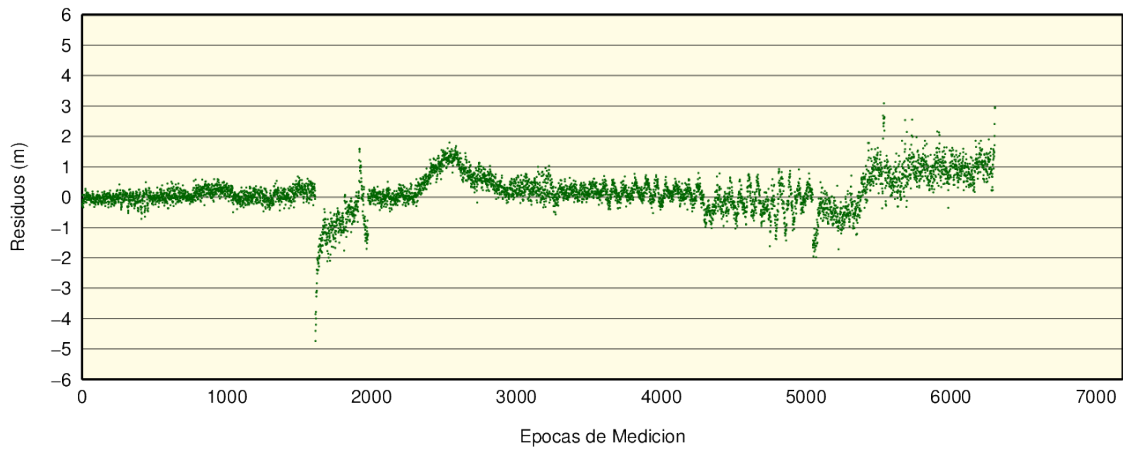
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV8)



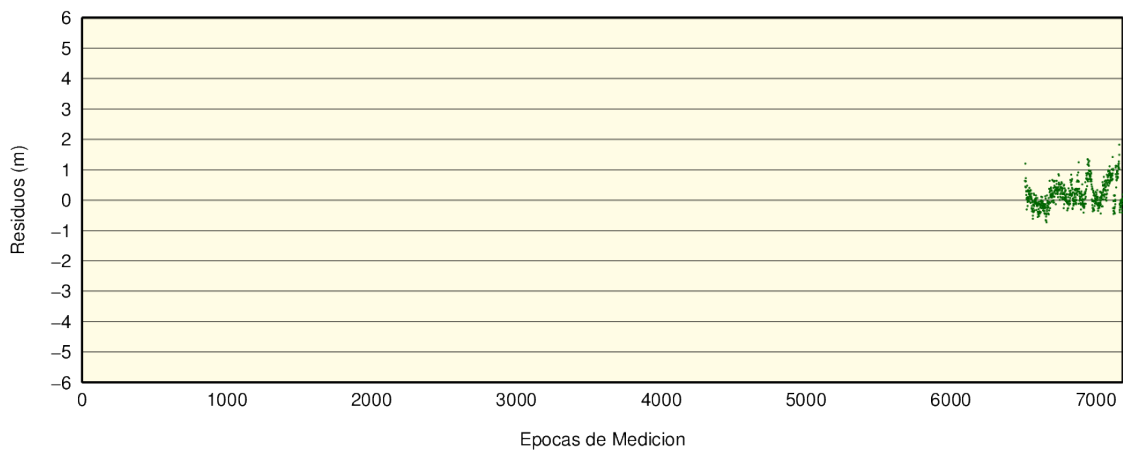
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV10)



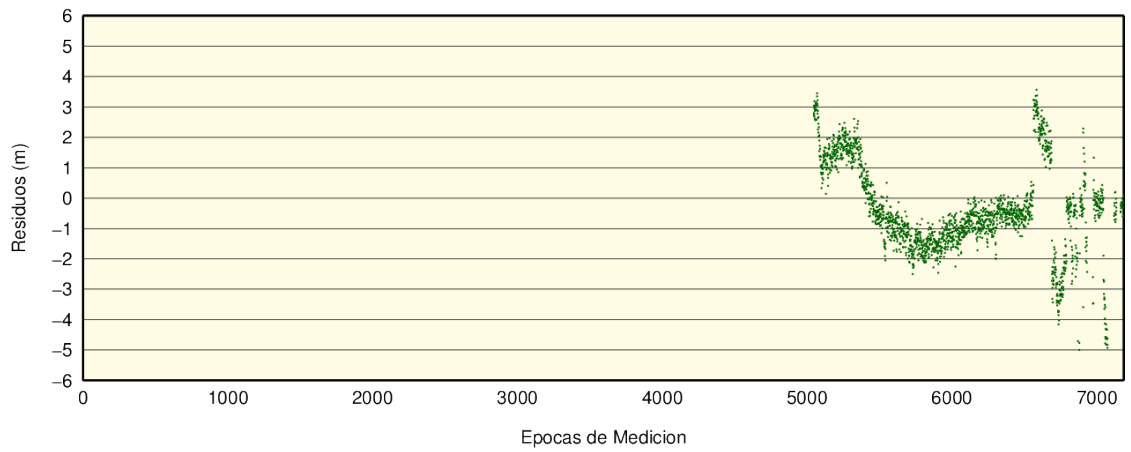
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV13)



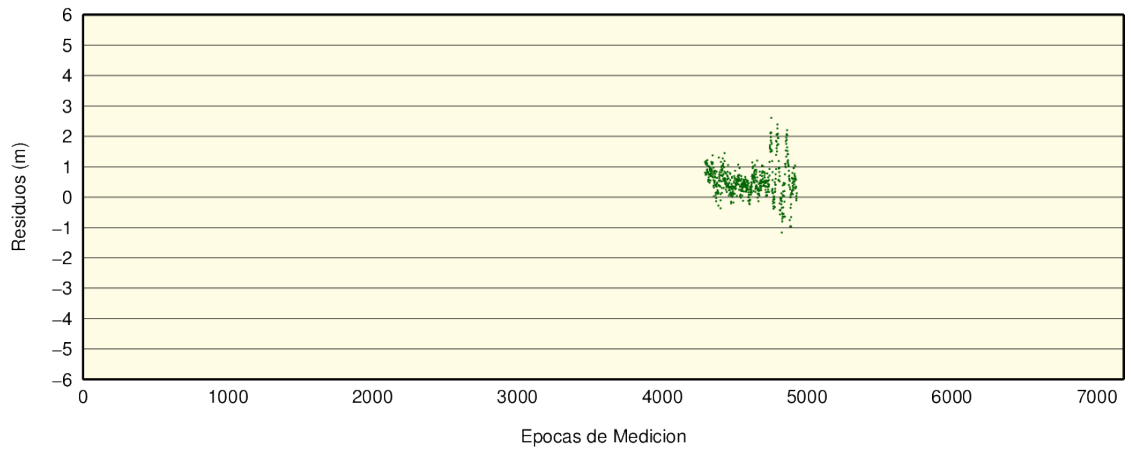
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV15)



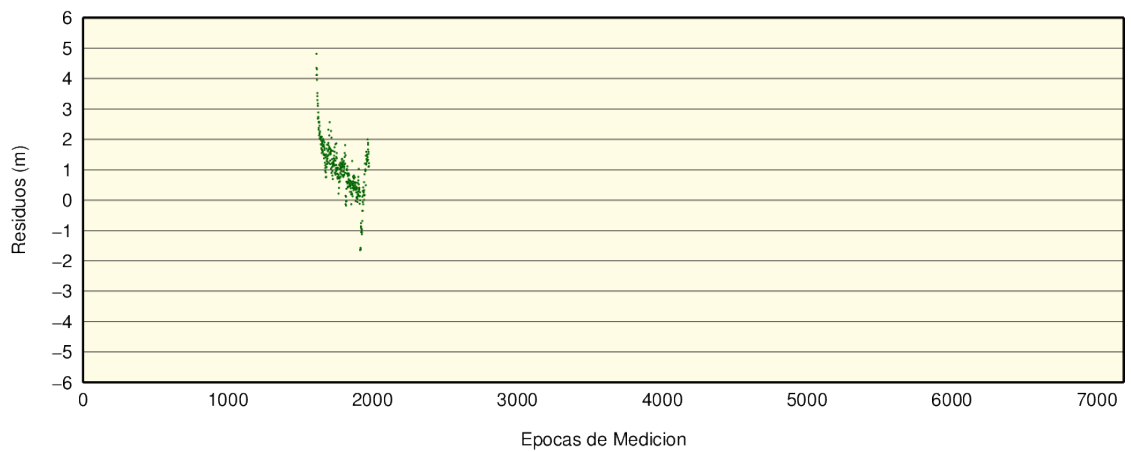
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV17)



Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV19)



Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV23)



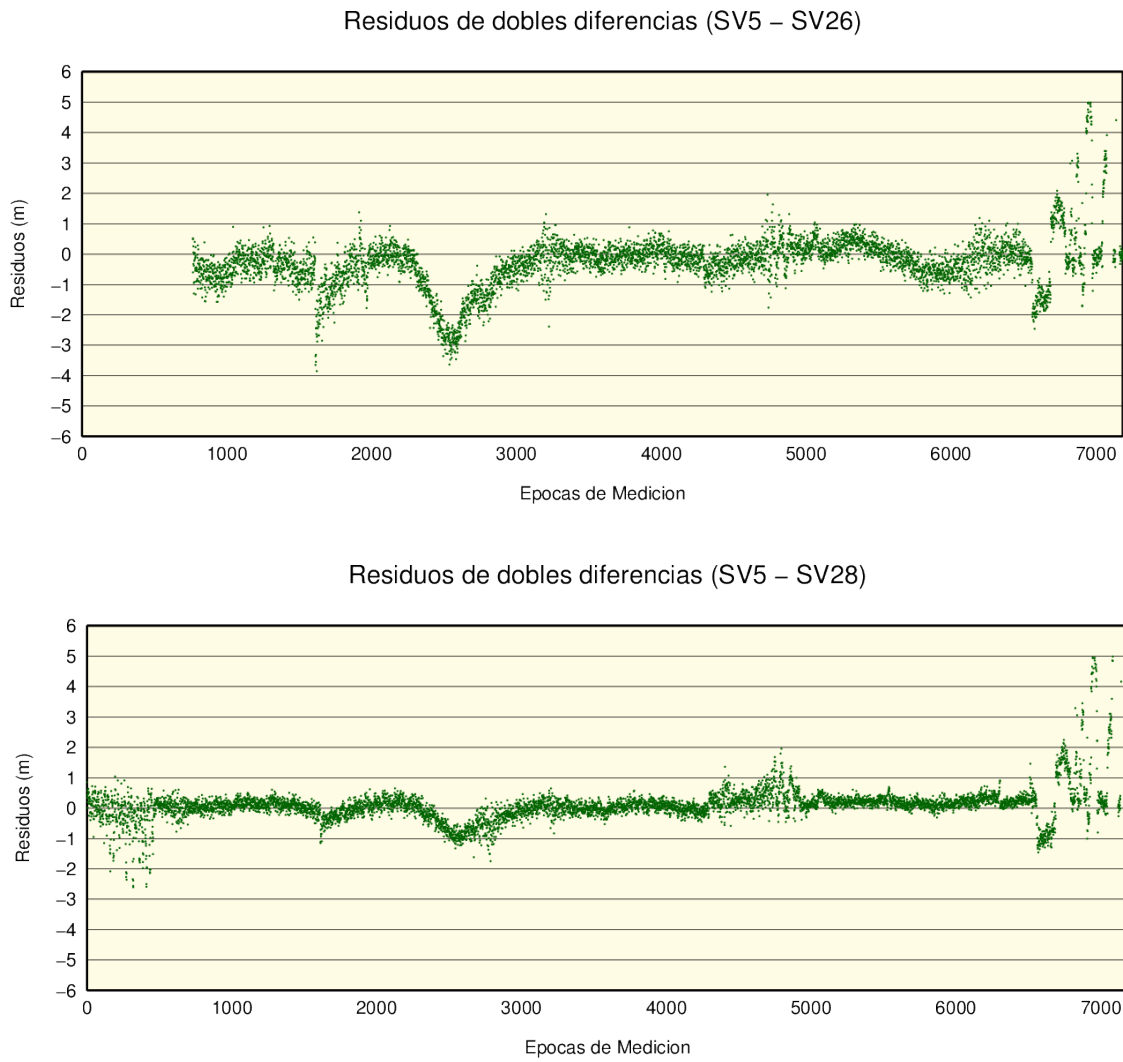
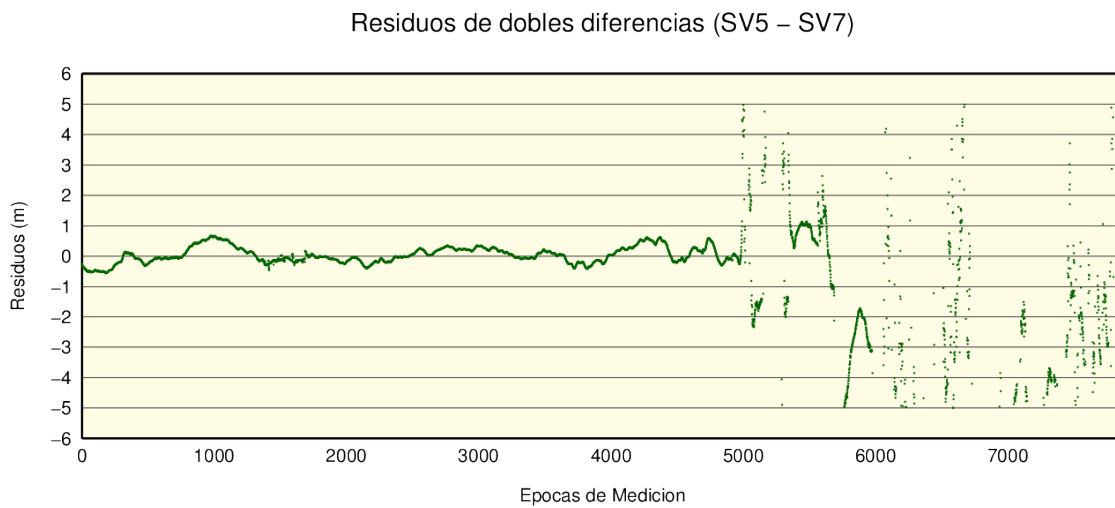
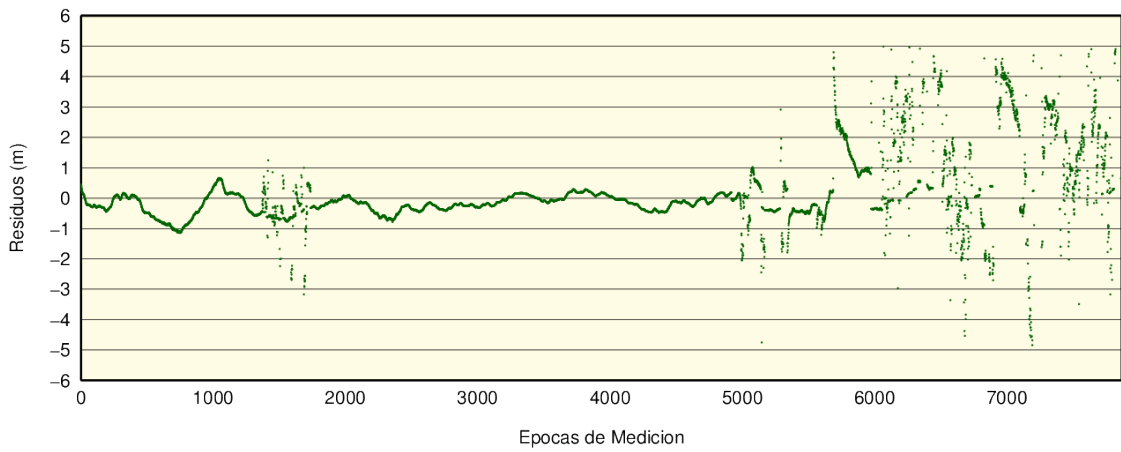


Figura 5.12: Residuos de dobles diferencias vector IGM1-FI07

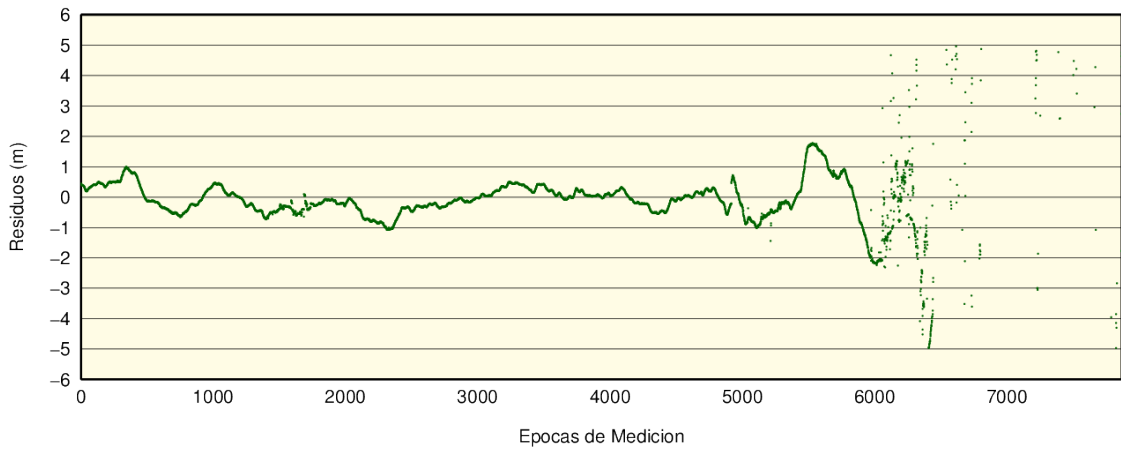
A continuación se presentan los gráficos de residuos de dobles diferencias para el procesamiento FI06-FI07



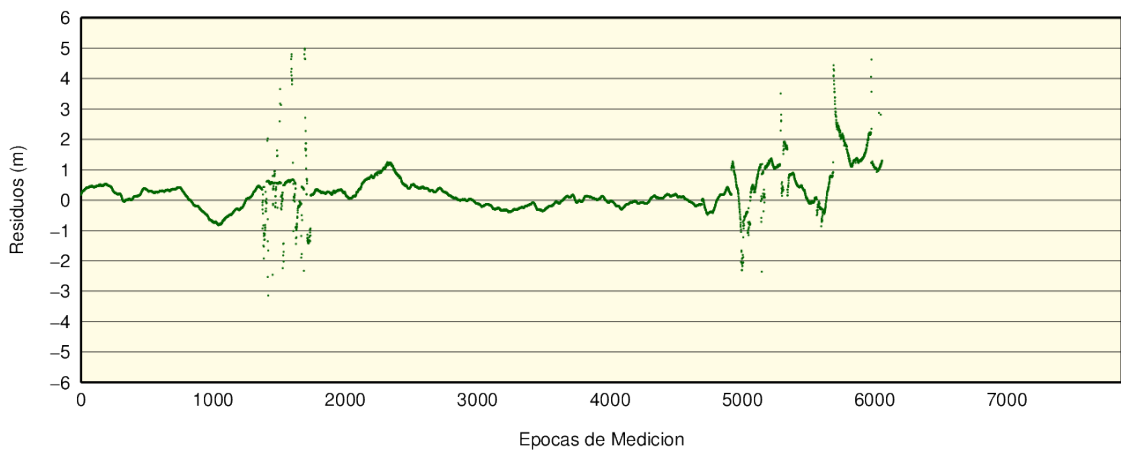
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV8)



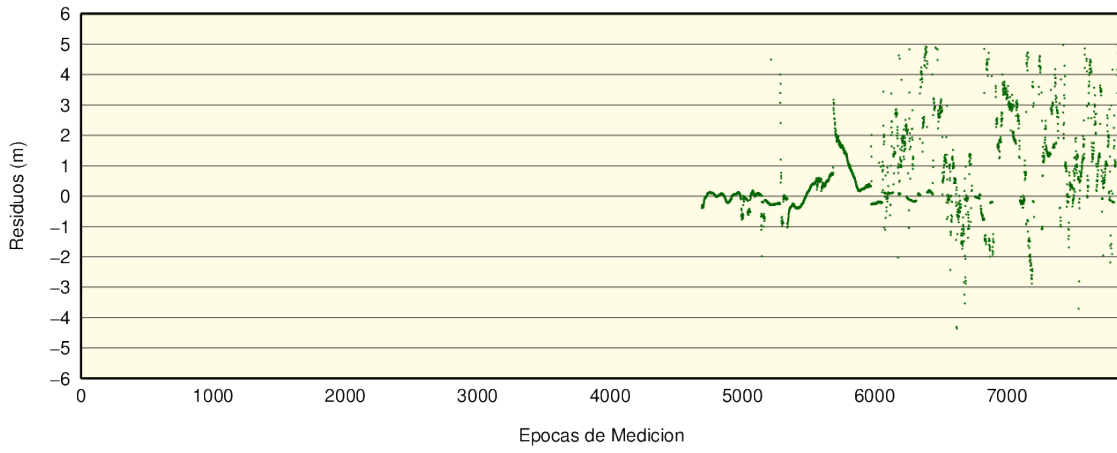
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV10)



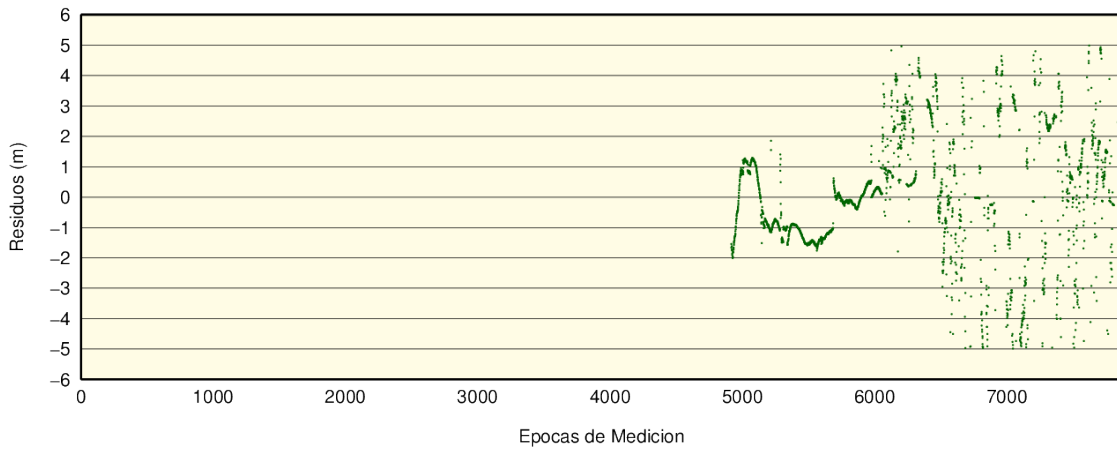
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV13)



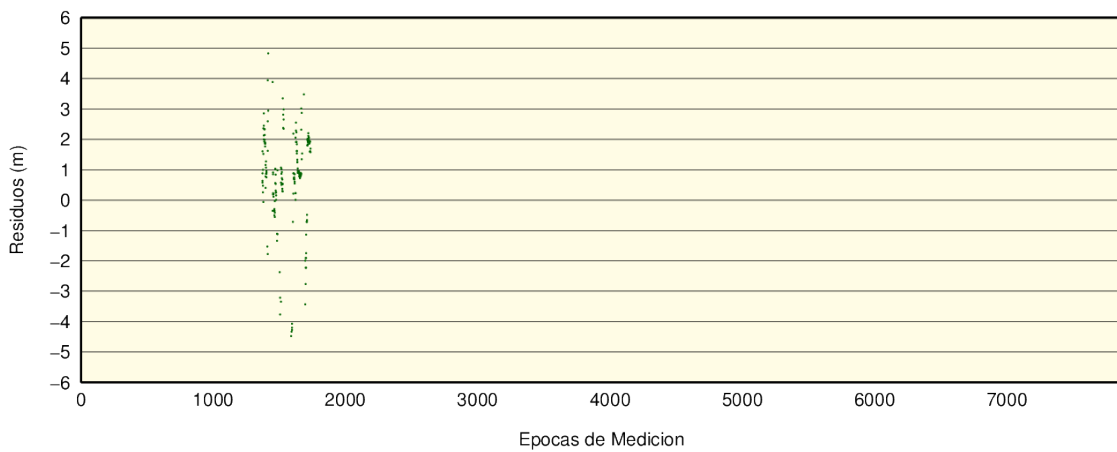
Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV15)



Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV17)



Residuos de dobles diferencias (SV5 – SV23)



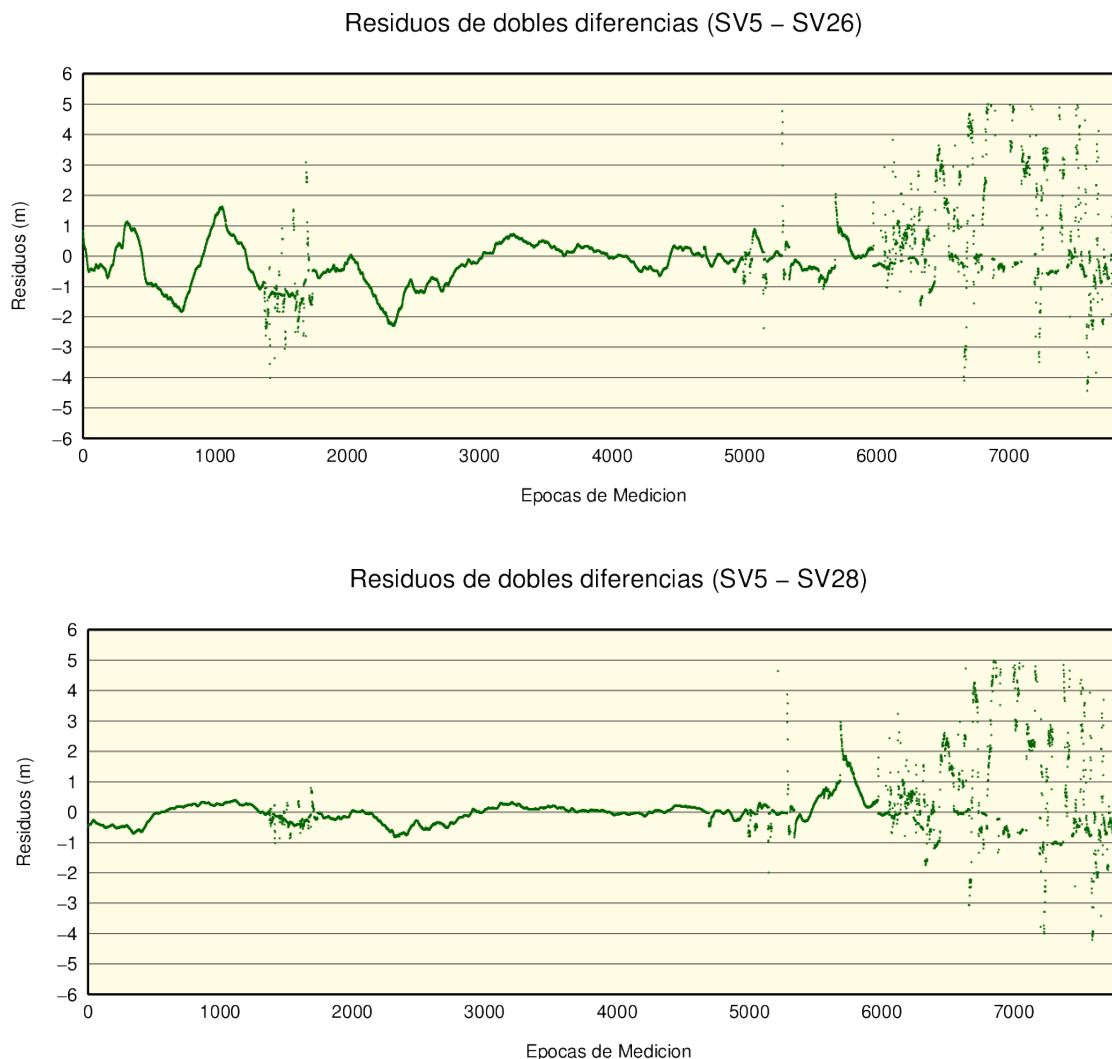


Figura 5.13: Residuos de dobles diferencias vector FI06-FI06

Para el último procesamiento presentado (FI06-FI07), puede apreciarse del gráfico resumen, la alta dispersión de las observaciones procesadas. Todas estas fueron correctamente filtradas utilizando el test de bondad de ajuste y 3σ . De los gráficos de residuos, es posible identificar muy fácilmente a partir de que época se presenta este problema. Como puede observarse, luego de la época 6000, todas los ajustes se tornan muy inestables. Esto podría sin duda deberse a un problema en el satélite de referencia, aunque debería realizarse un análisis más minuciosos para lograr identificar el origen de dicho inconveniente.

La intención de los cuatros ejemplos anteriores, fue la de mostrar procesamientos realizados con observaciones colectadas con receptores *Thales* Promark 3. Los siguientes dos ejemplos que a continuación se presentan, corresponden a procesamientos realizados con observaciones colectadas con un receptor *GlobalSat* modelo ET-332 y otro *Trimble* modelo AceII. En estos casos, las observaciones fueron realizados en sesiones de 1 hora o 1 hora y 30 minutos aproximadamente.

Vértice FI05

La tabla para la coordenada obtenida en FI05 es

Base	Vértice	Latitud		Longitud		Alt. [m]
FI00	FI05	-34°	35' 18.779"	-58°	23' 46.824"	67.71
dif. lat. [m]	dif. lon. [m]	dif. alt. [m]	σ lat. [m]	σ lon. [m]	σ alt. [m]	
-0.097	0.214	-0.044	0.738	0.365	0.570	

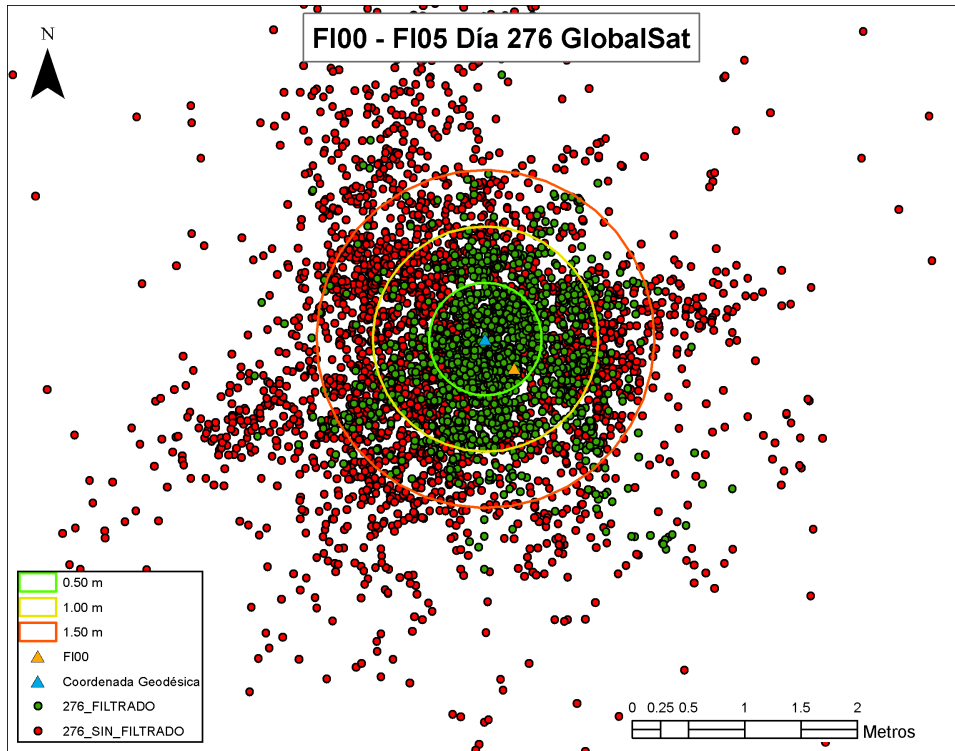
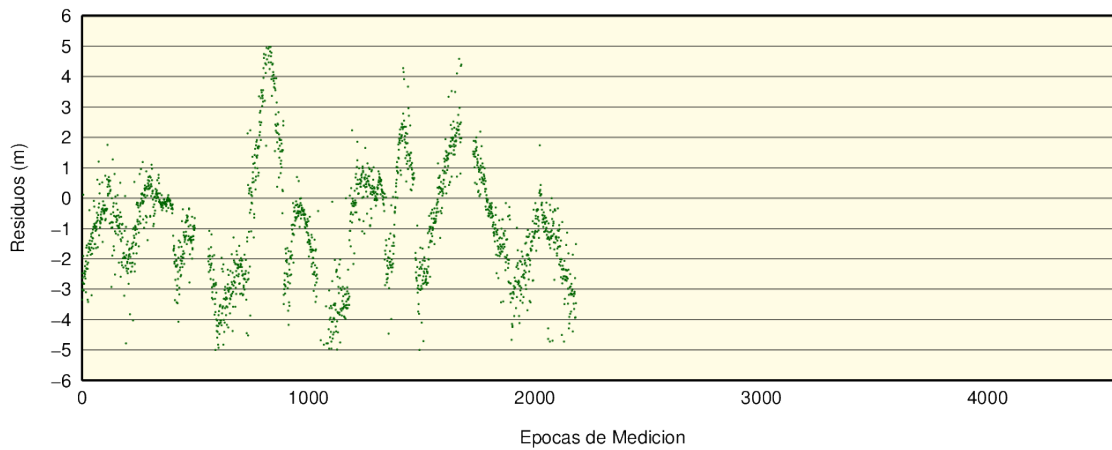


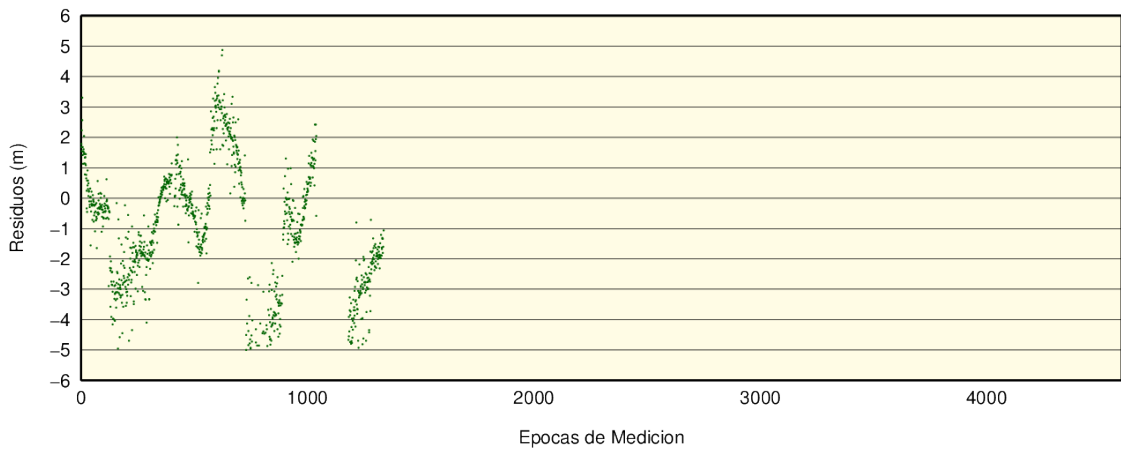
Figura 5.14: Gráfico del procesamiento de las observaciones (FI00-FI05) utilizando receptor *GlobalSat*.

Residuos de dobles diferencias

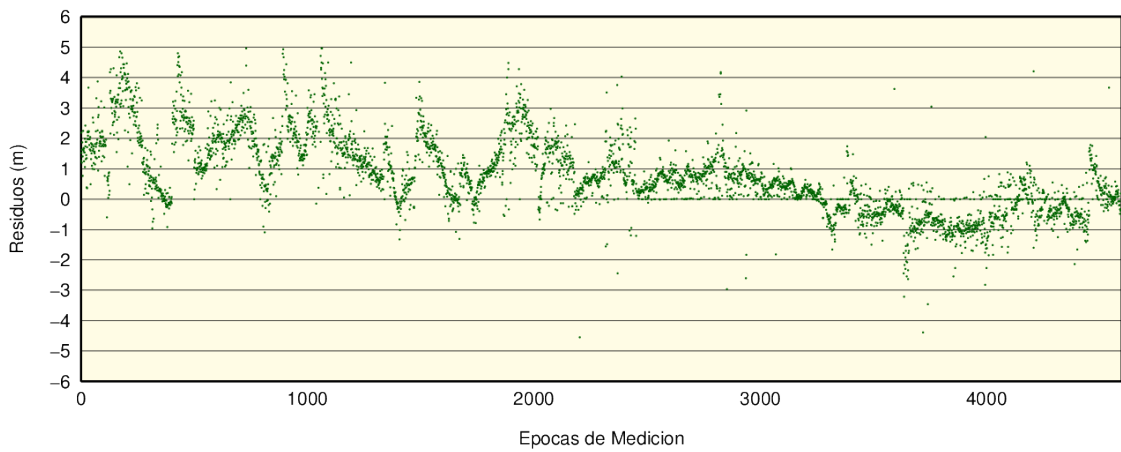
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV2)



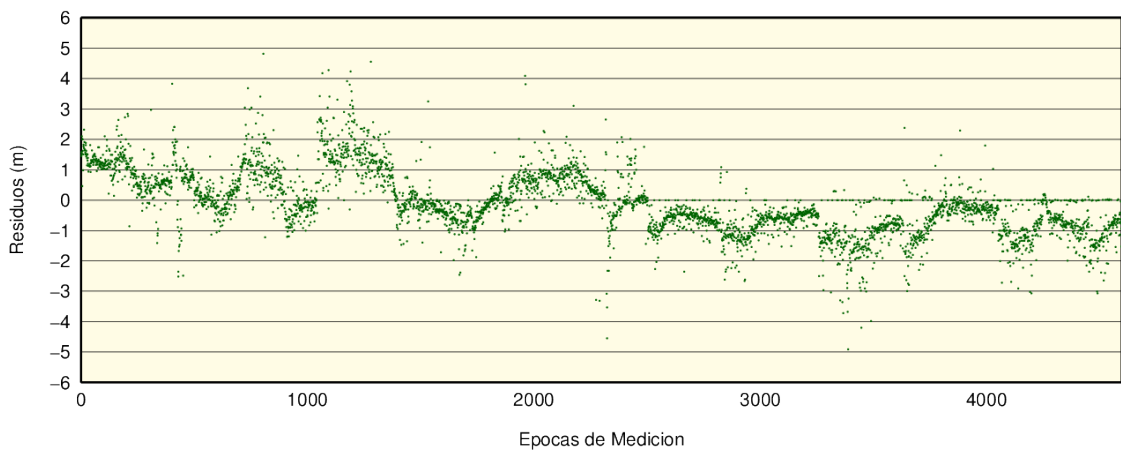
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV4)



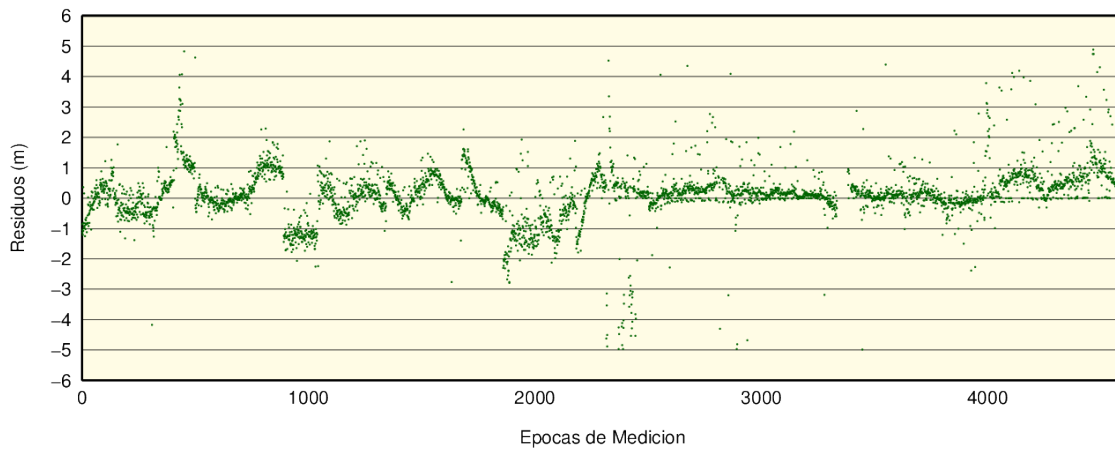
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV5)



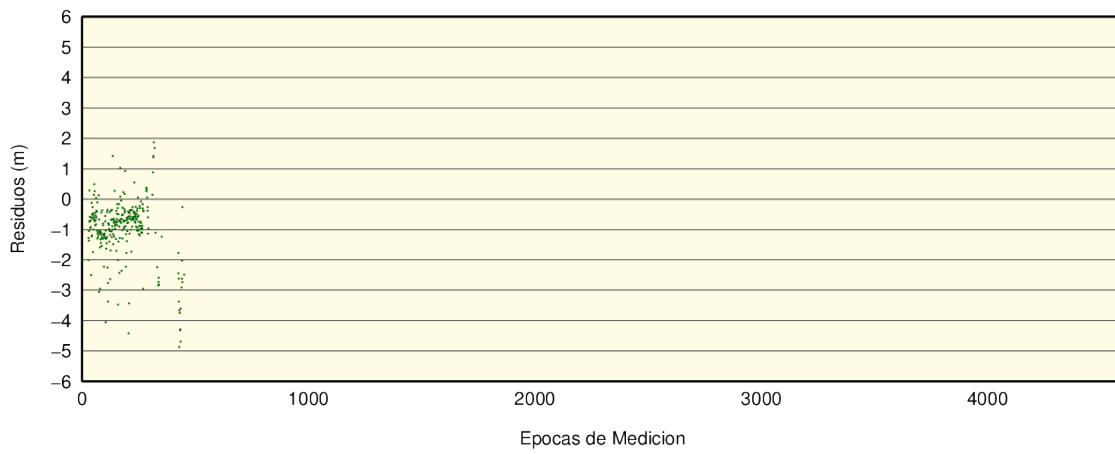
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV10)



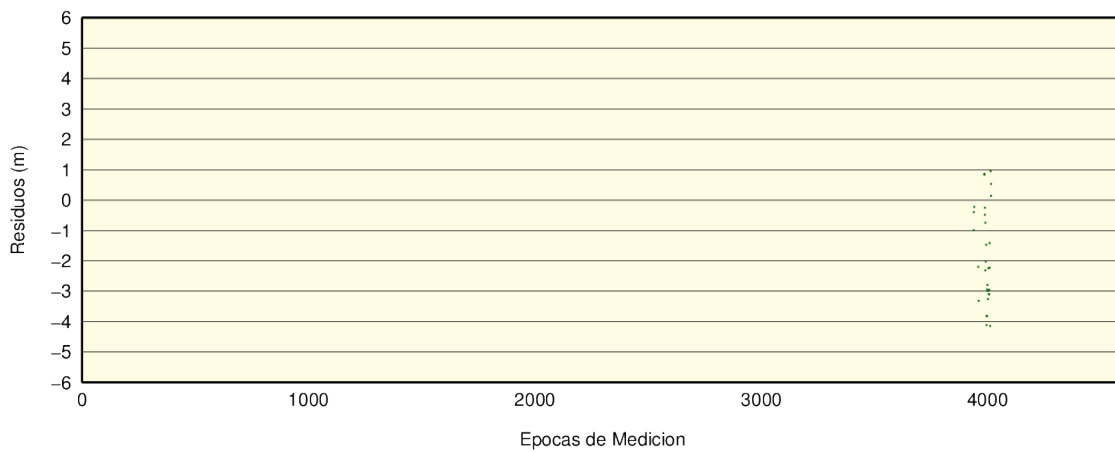
Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV13)



Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV16)



Residuos de dobles diferencias (SV7 – SV19)



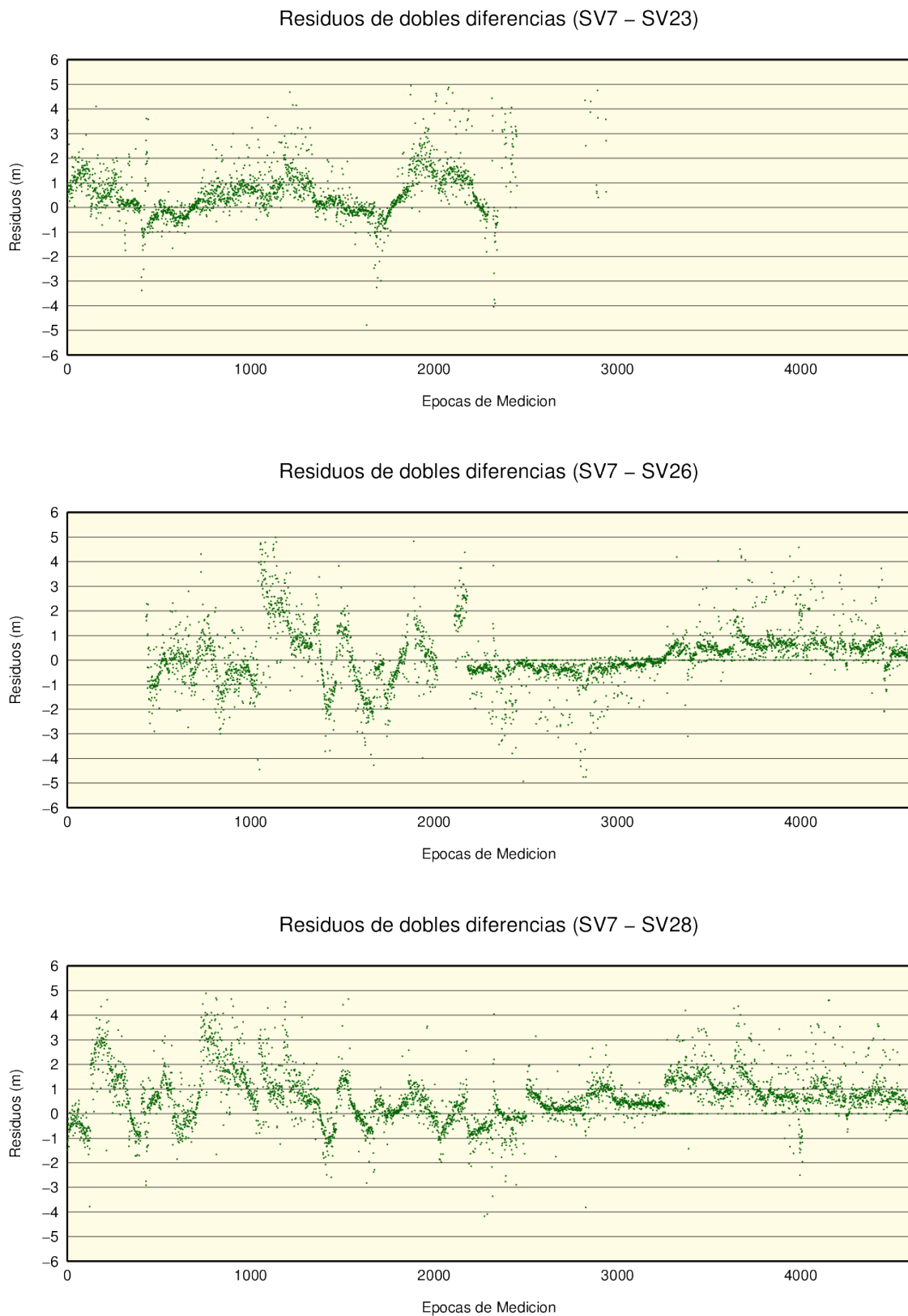


Figura 5.15: Residuos de dobles diferencias vector FI00-FI05

Vértice FI07

A continuación se presenta una observación realizada con el receptor *Trimble AceII*. La misma podría considerarse poco satisfactoria, puesto que debido a las condiciones de observación, se ha obtenido una coordenada sesgada que hace que la solución esté por fuera del intervalo de confianza hallado. El tiempo de observación de la misma fue de aproximadamente 1 hora.

Base	Vértice	Latitud			Longitud			Alt. [m]
IGM1	FI07	-34°	35'	19.964"	-58°	23'	46.969"	60.60
dif. lat. [m]	dif. lon. [m]	dif. alt. [m]	σ lat. [m]	σ lon. [m]	σ alt. [m]			
-0.335	0.887	-1.059	2.364	0.658	0.798			

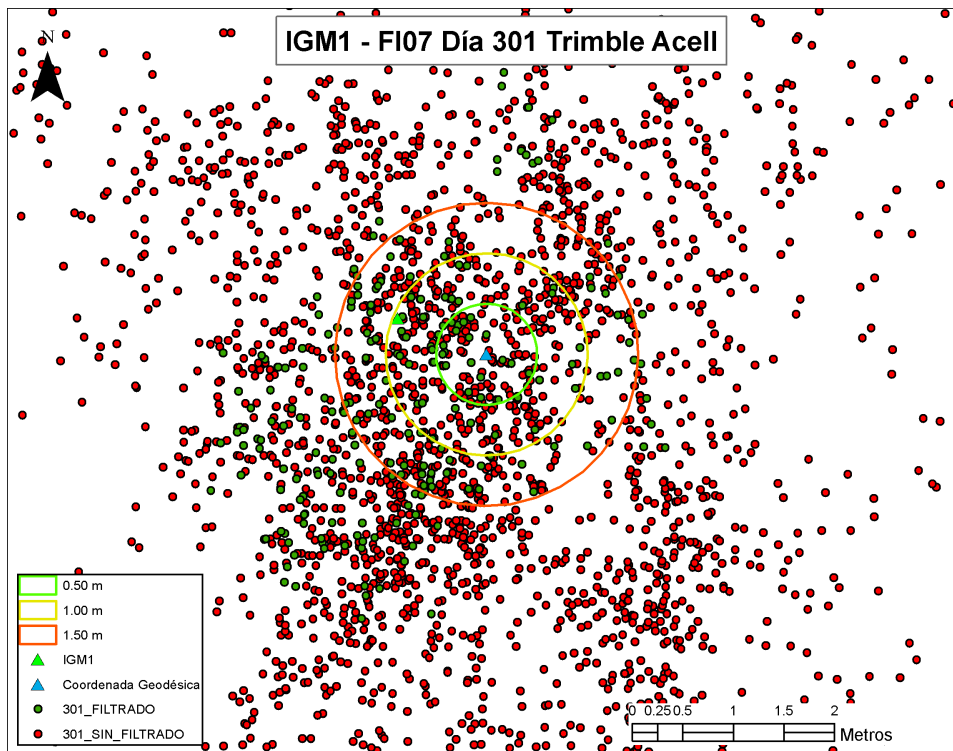
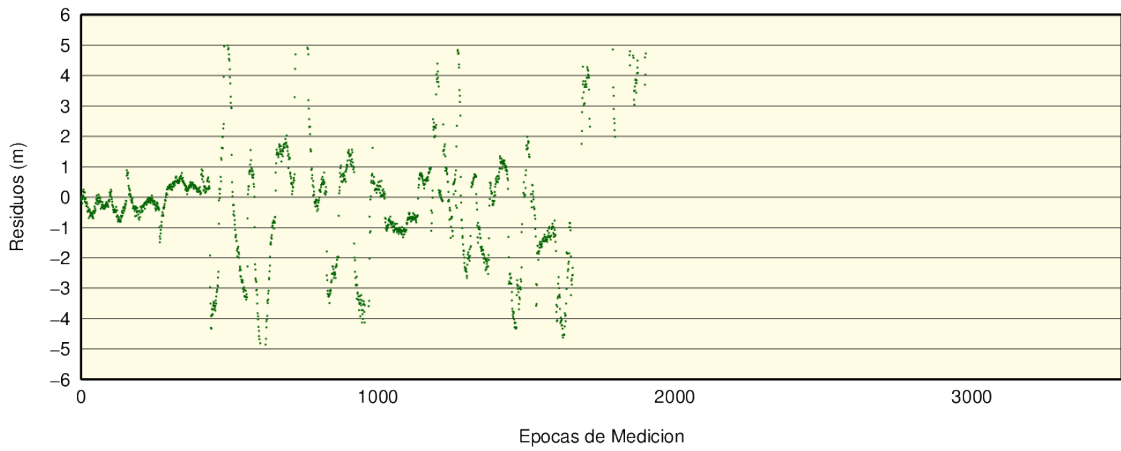


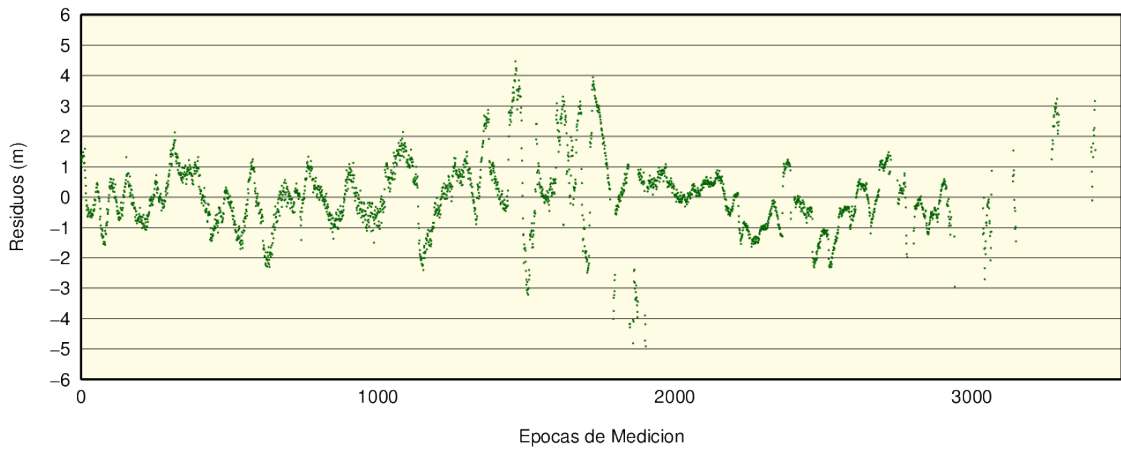
Figura 5.16: Gráfico del procesamiento de las observaciones (IGM1-FI07) utilizando receptor *Trimble*.

Residuos de dobles diferencias

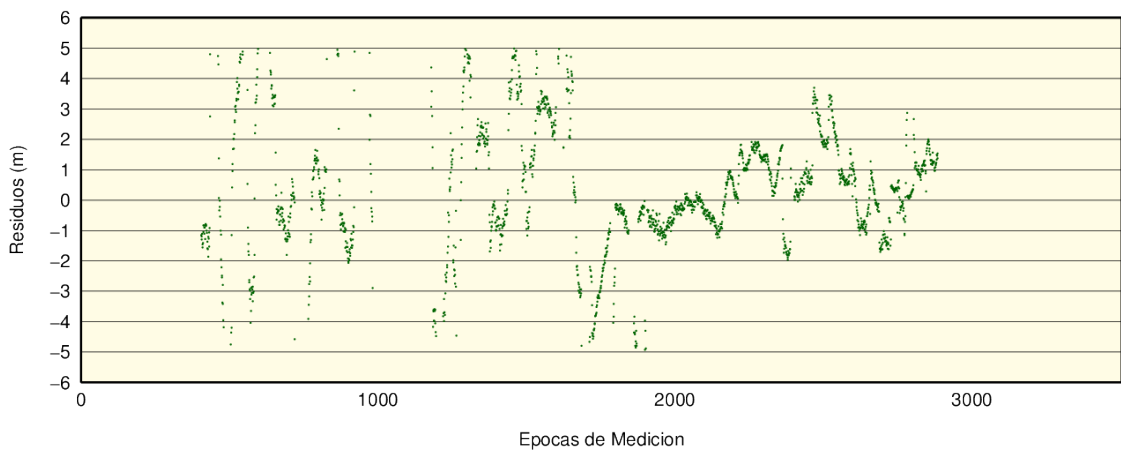
Residuos de dobles diferencias (SV26 – SV5)



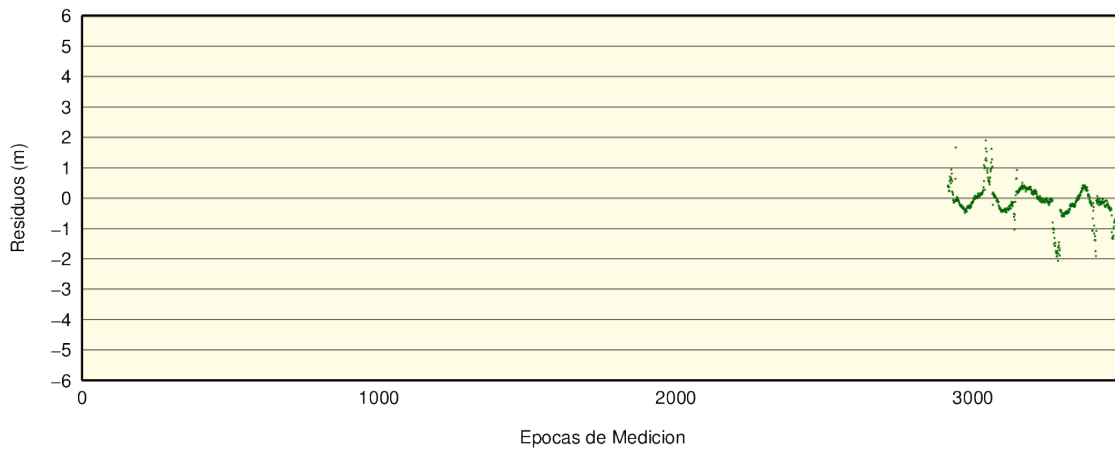
Residuos de dobles diferencias (SV26 – SV8)



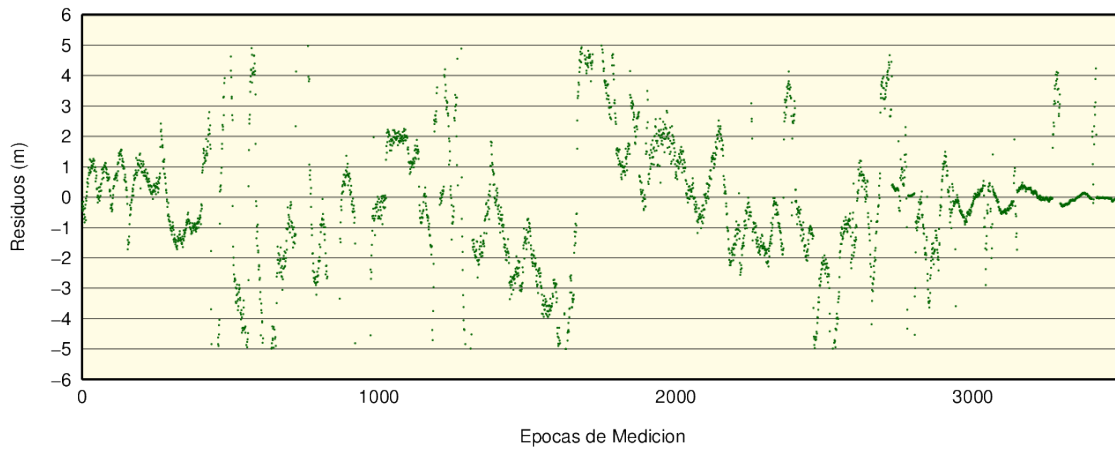
Residuos de dobles diferencias (SV26 – SV9)



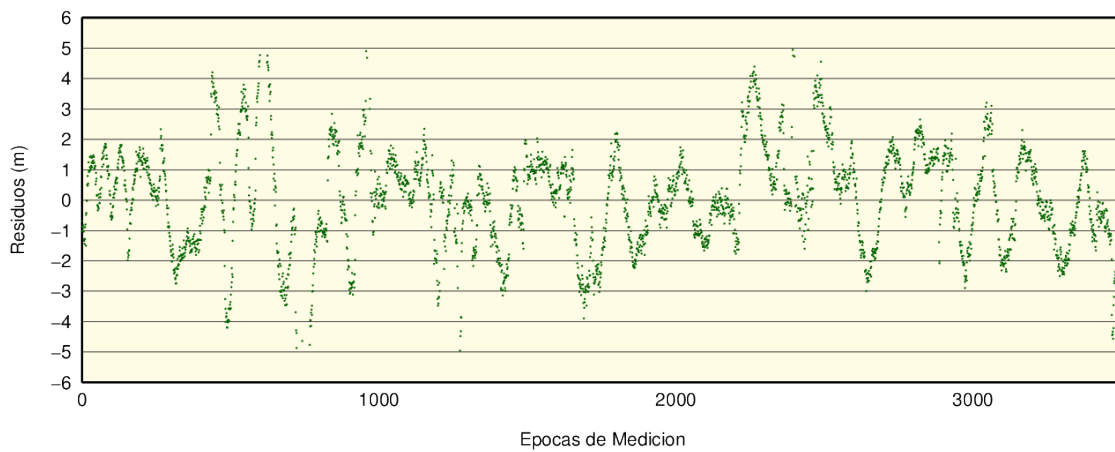
Residuos de dobles diferencias (SV26 – SV12)



Residuos de dobles diferencias (SV26 – SV15)



Residuos de dobles diferencias (SV26 – SV17)



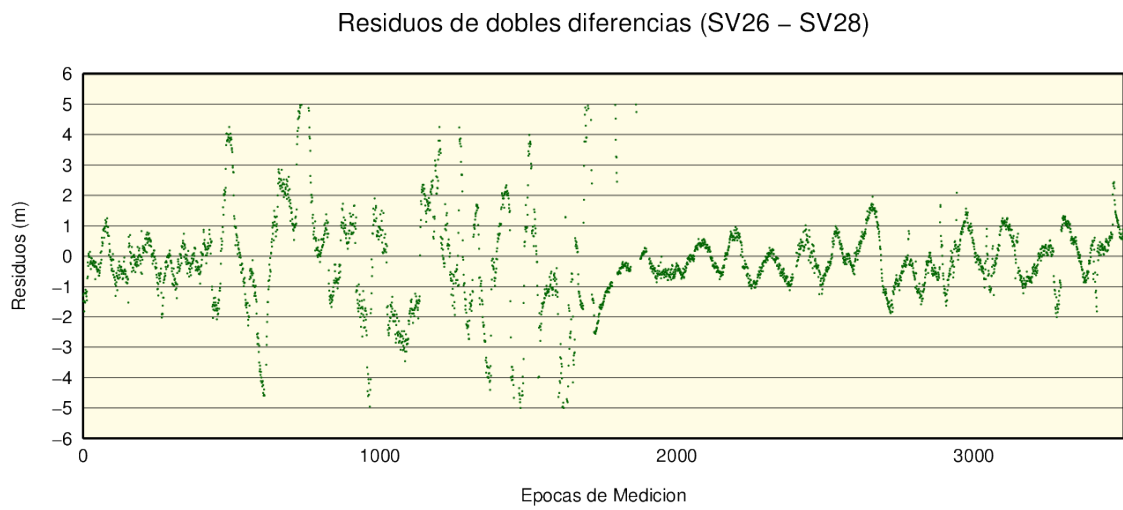


Figura 5.17: Residuos de dobles diferencias vector IGM1-FI07

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Luego de realizadas todas las observaciones y de analizados los resultados, fue posible arribar a ciertas conclusiones. En base a las mismas, se elaboró una metodología de observación para realizar mediciones estáticas en código C/A.

6.1. Dependencia del receptor: reloj interno

A pesar de que la dependencia del receptor durante una medición parece obvia a primera vista, el lector debería considerar que la teoría indica que durante el cálculo de las dobles diferencias, se eliminan los “errores” de los relojes de los receptores utilizados. La diferenciación de las ecuaciones permite eliminar dichos errores, denominados en inglés *clock bias*, que no son ni más ni menos que el término $\Delta b \cdot c$ visto en la ecuación (1.1).

Sin embargo, este método no permite eliminar la inestabilidad del reloj interno del receptor. En otras palabras, durante el proceso de medición de los tiempos de viaje de las señales GPS, el reloj del receptor introduce errores en dicha medición. Estos errores son diferentes para cada satélite, lo cual hace que cada pseudodistancia esté afectada por errores que no se corresponden con el error de sincronización del reloj interno del receptor.

Este tipo de errores debido a inestabilidades son cuantificables mediante un estimador estadístico denominado desvío de Allan. Dicho estimador fue desarrollado en la década de 1970 por el físico estadounidense David W. Allan. A modo ilustrativo, se presenta un gráfico de los diferentes desvíos de Allan para cada tipo de oscilador (reloj).

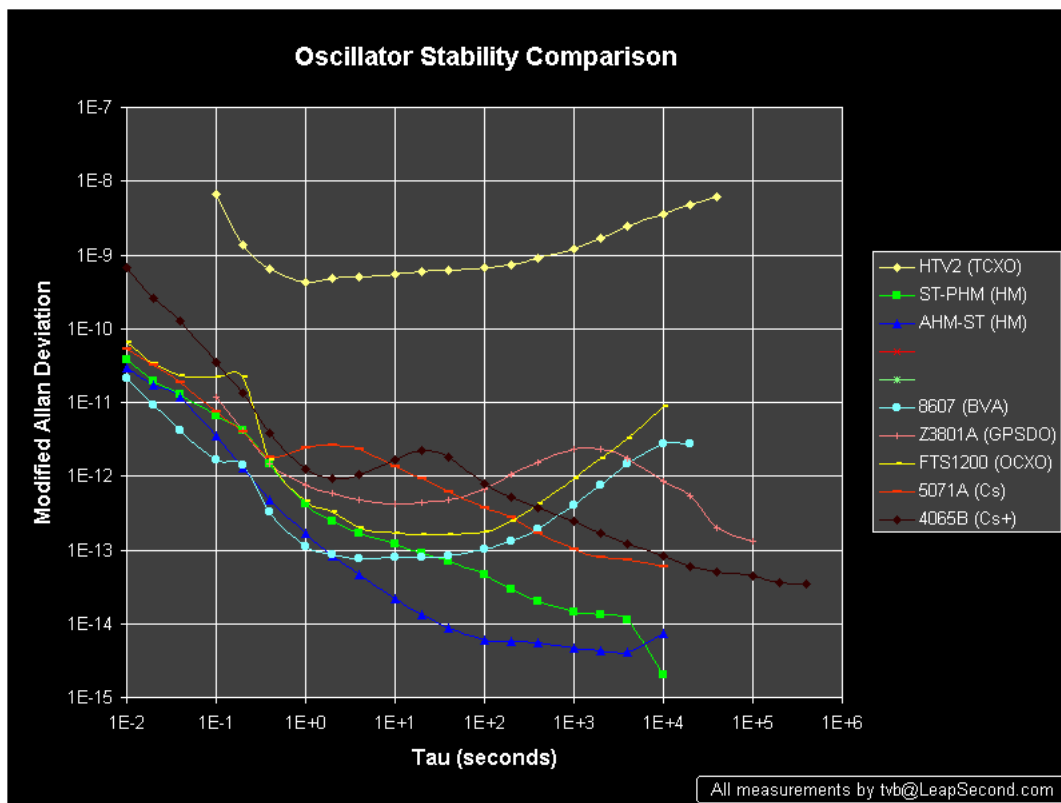


Figura 6.1: Desvíos de Allan para diferentes osciladores: imagen extraída de <http://leapsecond.com/>

El análisis realizado utilizando el desvío de Allan, permite seleccionar el reloj interno adecuado de acuerdo a la precisión que se desea alcanzar. Si se observan los resultados obtenidos utilizando receptores geodésicos, se verá que los mismos son menos dispersos que los obtenidos con receptores de bajo costo. Esto se traduce en la obtención de coordenadas finales más próximas a las reales. Es importante mencionar que para observar código C/A con receptores geodésicos, no se hace utilización de ninguna otra característica especial. La observación de inestabilidades más altas en receptores de bajo costo dependen directamente del diseño interno y no del método utilizado para procesar u observar.

La conclusión a la que se ha arribado no debe interpretarse como la recomendación de utilizar receptores geodésicos para observar código. Esto representaría un total contrasentido. De modo de obtener resultados tan buenos como los obtenidos utilizando los receptores *Thales*, se debería hacer una evaluación minuciosa del receptor a adquirir de manera de identificar el tipo de oscilador con el que cuenta. La instalación de un reloj más estable no implica un elevado costo en la fabricación del hipotético receptor, sino de un diseño pensado para otra actividad que no es la de navegador, como es el caso del receptor *GlobalSat*.

Relacionado con el factor del reloj interno, está también la estructura de aislación con la que cuenta el receptor. Esto es, el tipo de alojamiento para la electrónica del mismo. Para las observaciones realizadas, se han utilizado los receptores "al desnudo", donde la electrónica no ha tenido ningún tipo de aislación del medio ambiente. Esto hace que su oscilador interno se vea especialmente afectado por las variaciones de temperatura del ambiente.

6.2. Multipath

A la hora de realizar una medición GNSS, el peor enemigo del agrimensor o profesional a cargo es el *multipath*. Se denomina así al múltiple camino que podría tomar una señal GNSS al ser reflejada en superficies y luego captada por la antena del receptor. Esto hace que la componente geométrica de la pseudodistancia no se corresponda con la realidad. Para el caso de las mediciones en código C/A, esto podría representar la diferencia entre obtener una coordenada satisfactoria o no poder siquiera arribar a una coordenada métrica.

Es por demás interesante observar los gráficos de resumen de procesamiento de los vectores IGM1-FI00 versus MA02-FI00 e IGM1-FI07 versus FI06-FI07. Para sendos primeros casos (procesamiento realizado con IGM1), se puede observar una nube de puntos muy uniforme y poco dispersa. Para el segundo caso, observando detenidamente, se aprecian especies de “caminos” que han ido dibujando las coordenadas calculadas durante el procesamiento. Una posible explicación a esta especie de caminos es la condición de emplazamiento de las estaciones utilizadas para procesar. Tanto FI06 como MA02 se encuentran emplazadas en posiciones donde es posible deducir la presencia de *multipath*. Para el caso de MA02, la misma se encuentra en una zona de edificios altos y con alta posibilidad de tener *multipath*. Lo mismo ocurre para FI06. Pero, para el caso de IGM1, la misma se encuentra muy alejada de edificaciones. Se puede apreciar que las observaciones procesadas con FI06 o MA02 dan como resultado una nube de puntos menos uniforme.

A pesar de ello, los filtros implementados logran satisfactoriamente eliminar este tipo de observaciones, pudiéndose arribar a una coordenada aceptable. Esto último no tiene por intención inducir al lector a pensar que se ha encontrado un filtro para *multipath*, ya que deberían efectuarse más pruebas exclusivamente orientadas a este tema.

6.3. Metodología de observación

Como recomendación final, se han propuesto una serie de ítems de modo de dar una guía para realizar una medición estática observando código C/A. Para la misma, deberían seguirse las siguientes recomendaciones:

6.3.1. Selección de la estación

Para este paso, se supondrá que se desean obtener dos puntos con coordenadas latitud y longitud en base a los cuales se realizará un relevamiento topográfico a una escala determinada, acorde a la precisión obtenida con esta técnica. La selección de los puntos a medir deberá tener muy en cuenta, además de la habitual visibilidad del cielo, el factor *multipath*.

La cercanía de una construcción ha demostrado tener una influencia muy nociva en la obtención de la coordenada. Además, es muy importante recordar que las antenas de receptores de bajo costo no tienen protección física contra *multipath* (*ground plane*, *choke ring*, etc.) por lo que un pequeño espejo de agua debajo del receptor GPS podría ocasionar problemas indeseados.

En caso de medirse dos puntos (origen y azimut) en situaciones de potencial *multipath*, debería siempre realizarse una simple verificación de la distancia espacial entre los puntos utilizando una cinta métrica. Esto servirá luego como contralor de las coordenadas ECEF obtenidas.

6.3.2. Tiempo de medición

Es muy importante tener en cuenta que el tiempo de medición es crucial durante una observación en código. Esto es igual de importante durante una medición de fase de portadora, pero existe una clara diferencia. Si la medición de fase de portadora fue de baja calidad o corta, es muy posible que el post-proceso no consiga fijar ambigüedades de ciclos. Para el caso de mediciones en código, un tiempo de ocupación excesivamente corto podría dar como resultado una observación con un sesgo que el software de procesamiento no sería capaz de detectar. Esto implica que luego del post-proceso, se obtendrían coordenadas dentro de un intervalo de confianza aceptable pero a una distancia de la coordenada real de la estación ocupada muy superior a la estimada (como el caso presentado para el vértice FI07 observado con el receptor *Trimble*).

Para evitar este tipo de inconvenientes, el profesional debería siempre realizar mediciones no inferiores a 1 hora y, preferentemente, superar la hora y media de observación. Este dato parte de la mera experiencia adquirida durante el desarrollo de las observaciones realizadas para este trabajo.

6.3.3. Intervalo de registro

El intervalo de registro, aunque podría configurarse en cualquiera de los habituales, es conveniente que sea de 1 segundo. Esto permite aumentar la cantidad de épocas disponibles a la máxima posible, por lo que el resultado de observar 1 hora dará lugar a 3600 épocas de medición.

6.3.4. Condiciones del receptor

Las condiciones a las que se somete el receptor utilizado, también presentan gran importancia a la hora de realizar una medición, no siendo el caso en la utilización de receptores geodésicos. Como ya se ha visto durante este capítulo, las variaciones de temperatura podrían tener efectos adversos en la estabilidad del oscilador interno del receptor utilizado.

Por esta razón, se recomienda utilizar alguna protección adicional sobre el receptor. Esto podría ser, colocarlo dentro de una mochila, evitando la radiación solar directa sobre el mismo.

6.3.5. Tipos de observables registradas

Es importante destacar que, para el algoritmo de post-proceso, se ha hecho uso del valor del SNR en la determinación del modelo estocástico, tal como se vio durante el capítulo 3 y 5. Es por ello que, para lograr procesar exitosamente, el receptor utilizado deberá reportar los valores de SNR observados para cada satélite.

Algunos receptores incluyen este valor dentro de la propia observación de fase (receptores que estiman la fase para suavizar pseudodistancias). El mismo corresponde a un índice de calidad de la observación que tiene un rango de 1 a 9. Estos índices pueden traducirse a SNR utilizando la técnica detallada en el manual del formato RINEX. Esta traducción de índice a SNR está contemplada dentro de la aplicación desarrollada.

6.3.6. Inspección de los residuos y gráficos resúmenes

Aunque la inspección de los resultados del post-proceso no son estrictamente un ítem de alcance de la metodología de observación, se ha considerado importante hacer mención ha ello como recomendación final del proceso “medición - procesamiento”.

Como se ha podido ver en diferentes mediciones realizadas, es posible inferir si un resultado es aceptable o si se debe desconfiar del mismo en base a la distribución de las coordenadas en el gráfico resumen y de los residuos de dobles diferencias.

Analizando con detenimiento el vector IGM1-FI07, es posible observar que tanto los puntos que han superado el test de bondad de ajuste como los que no, se encuentran muy por afuera del radio de 1.5 metros. Además, no es posible observar que existe un “núcleo” de puntos que han pasado el test en los alrededores de la coordenada obtenida. De la misma forma, la dispersión de los residuos de dobles diferencias es notablemente mayor que para el resto de los vectores observados.

Esta herramienta visual es de mucha utilidad al momento de decidir si es verosímil o no el intervalo de confianza hallado durante la observación. Como se pudo ver en la tabla de coordenadas para el vértice FI07 (ver capítulo 5, p. 66), los intervalos de confianza calculados no coinciden con los errores resultantes de la comparación de coordenadas.

Por ello, es muy recomendable dar un vistazo al gráfico resumen (desde la misma aplicación, haciendo clic en “Ver Ploteo Sin Filtrado”) para saber en qué rango se encuentran las observaciones procesadas.

6.4. Aplicación del software a sistemas de información geográfica

Resultaría algo extenso detallar cada una de las aplicaciones del programa desarrollado, a los sistemas de información geográfica, dada la diversidad de utilidades y profesiones que hoy hacen uso de dichos sistemas. Uno de los desafíos al trabajar con información georreferenciada, es la capacidad de lograr incorporar nuevos datos al sistema con la adecuada precisión de acuerdo a la necesidad.

Para el caso de proyectos que no requieren precisiones mejores que 80 centímetros y que además no cuentan con el presupuesto para la adquisición de equipamiento comercial, esta aplicación podría resultar especialmente útil. Para dar algunos ejemplos, podrían mencionarse algunas experiencias que el autor ha podido recopilar durante el desarrollo de este trabajo.

La primera posible aplicación surgió durante una visita a una organización no gubernamental (ONG) que se dedica al área de conservación de la flora y fauna silvestre. Dicha institución realiza, con cierta frecuencia, levantamientos expeditivos en los cuales requieren ubicar en su sistema de información geográfica -de distribución gratuita como gvSIG- conjuntos de vegetación de tronco no leñoso¹, límites de zonas de estudio y otras. En principio, 1 hora de medición para obtener una coordenada submétrica podría parecer un problema, dada la baja productividad de un día de salida de campo. Sin embargo, los responsables del área de SIG de la ONG no se mostraron preocupados ante esta limitación impuesta por el método utilizado. Esto se debe fundamentalmente a que, dado el bajo costo del equipamiento, podrían utilizarse

¹Vegetación que no desarrolla altura ni puede clasificarse como árboles.

varios receptores en forma simultánea. Es importante mencionar que, para una mayor eficiencia y practicidad durante el lavantamiento, sería necesaria la incorporación de los algoritmos que hacen posible realizar mediciones en modo cinemático. Como ya se ha mencionado, esta tarea quedará como propuesta para futuros estudiantes.

La más interesante de todas las aplicaciones fue la propuesta por el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE). Durante el proceso de calibración del satélite SAC-D/Aquarius, puesto en órbita el 10 de junio de 2011, dicho instituto estuvo a cargo de la calibración del sensor de humedad que lleva a bordo el satélite. El proceso de calibración consiste en realizar observaciones de humedad sobre el terreno al mismo tiempo que el satélite realiza una pasada sobre el sitio de prueba. Para ello, la observación realizada en tierra deberá compararse con el píxel correspondiente a la zona medida. Dado que los píxeles de dicho sensor tienen una dimensión de 90 centímetros de alto por 90 centímetros de ancho, una coordenada dentro de este entorno alcanza para lograr identificar el píxel de prueba obtenido con los sensores del satélite.

El personal del IAFE manifestó su gran interés en utilizar el algoritmo propuesto en esta tesis, con el objetivo de obtener la coordenada de la posición del medidor de humedad para luego realizar la calibración del instrumento que se encuentra a bordo del SAC-D. La propuesta sigue vigente y ya se ha transferido parte del código fuente de las librerías desarrolladas, puesto que al momento de entablar la comunicación con la institución, este trabajo todavía se encontraba en desarrollo.

Anexo A

Información general

El presente anexo recopila la información referente a receptores utilizados, protocolos involucrados durante el desarrollo del trabajo así como también datos de las estaciones permanentes RAMSAC utilizadas para el procesamiento de las observaciones de la micro red geodésica.

A.1. Receptores utilizados

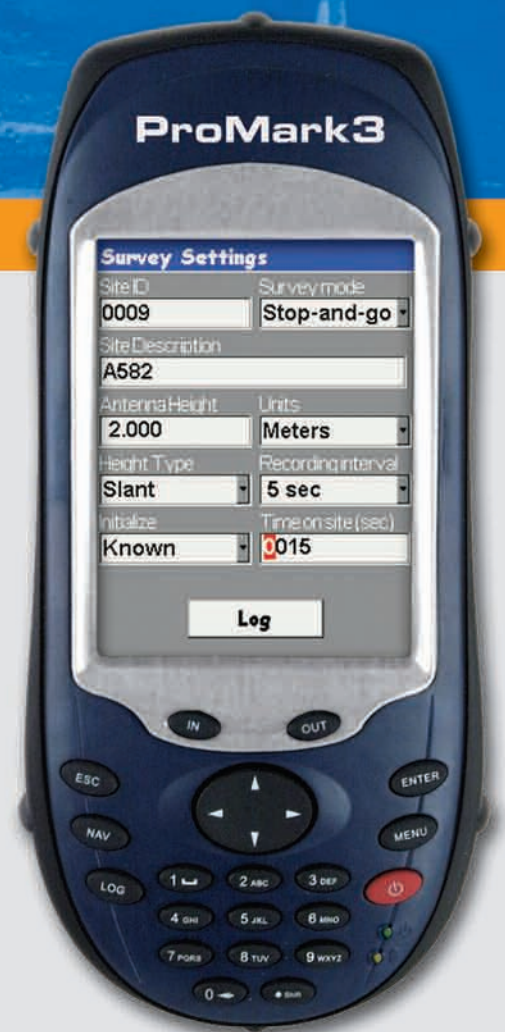
A.1.1. Thales Promark 3

A continuación se incluye la información referente a los receptores Thales modelo Promark 3 utilizados para la observación de vectores utilizando observable de fase. El presente documento ha sido extraído directamente del fabricante.

ProMark™ 3



Innovando En La Topografía GPS



Características GNSS

- 14 canales paralelos
- L1 código y fase portadora
- WAAS/EGNOS en tiempo real integrado
- Velocidad actualización: 1 Hz
- Protocolo: NMEA0183
- RTCM SC-104 versión 2.1

Especificaciones de precisión

Levantamiento estático

Rendimiento¹⁻³ (rms)

- Horizontal: 0,005 m + 1 ppm (0,016 pies + 1 ppm)
- Vertical: 0,01 m + 2 ppm (0,032 pies + 2 ppm)
- Azimut: < 1 arco segundo
- Tiempo de observación: Va de 4 a 40 minutos en función de la distancia entre los receptores ProMark3 y otros factores ambientales

Rendimiento del levantamiento cinemático

- Horizontal: 0,012 m + 2,5 ppm (0,039 pies + 2,5 ppm)
- Vertical: 0,015 m + 2,5 ppm (0,049 pies + 2,5 ppm)
- Tiempo de ocupación recomendado con barra inicializadora: 5 minutos

Precisión en tiempo real³

SBAS (WAAS/EGNOS) (rms)

- Horizontal: <1m

DGPS (Baliza o RTCM) (rms)

- Horizontal: <1m

Características de registro de datos

Intervalo de grabación

- 1 - 30 segundos

Capacidad de memoria interna

- Hasta 72 horas de datos de 10 satélites a intervalos de 1 segundo

Características físicas

Tamaño

- Unidad: 19,5 x 9 x 4,6 cm
- Antena: 19 x 9,6 cm

Peso

- Unidad: 0,48 Kg. incluyendo batería
- Antena: 0,45 kg

Interfaz usuario

- Pantalla de cristal líquido TFT avanzada a todo color, con iluminación posterior
- Resolución 320 x 240 con 262 144 colores
- Panel táctil resistente
- Teclado de 20 botones con iluminación posterior
- Audio: altavoz integrado

Información de contacto de soluciones de levantamiento:

En Francia +33 2 28 09 38 00 ■ Fax +33 2 28 09 39 39

En Alemania +49 81 6564 7930 ■ Fax +49 81 6564 7950

En los Países Bajos +31 78 61 57 988 ■ Fax +31 78 61 52 027

En Rusia +7 495 956 5400 ■ Fax +7 495 956 5360

Email surveysales@magellangps.com

En Sudamérica 56 2 273 3214 ■ Fax +56 2 273 3187

Email surveysales@magellangps.com

www.pro.magellanGPS.com

Memoria

- 128 MB SDRAM, 128 MB memoria Flash NAND
- Tarjeta SD extraíble: hasta 1 GB

Interfaz

- RS232
- USB: host y esclavo
- Tecnología inalámbrica Bluetooth
 - Compatible con la especificación 1.2
 - Punto a punto y punto a multipunto
 - Perfiles: puerto serie, OBEX, red de marcado

Características ambientales

Receptor

- Temp. de funcionamiento -10°C a 60°C
- Temp. almacenamiento: -20°C a 70°C
- Condiciones: Resistente al agua
- Golpes: caída sobre hormigón de 1,5 m (4,9 pies)

Antena

- Temp. operativa: -55°C a 85°C (-67°C a 70°C)
- Condiciones: Resistente al agua
- Golpes: 2 m caída sobre hormigón

Características de alimentación

- Tipo de batería: litio-Ion 3,7 V, 3.900 mAh
- Duración de las pilas: 8 horas (funcionamiento normal)
- Alimentación externa para un mayor tiempo de funcionamiento

Herramientas de software de campo

- Utilidades GPS
- Bluetooth Manager
- Sistema / Copia de seguridad de datos / Restaurar

Idiomas disponibles en el receptor

- Inglés, francés, alemán, español, italiano, portugués, finlandés, sueco, holandés, idioma personalizado²
- Ruso

Accesorios

Accesorios estándar del sistema

- Módulo E/S acoplable con alimentación, puertos USB y RS232
- Adaptador CA universal
- Lápices (2)
- Correa de mano
- Funda de transporte
- Cable de datos USB
- Tarjeta de memoria SD de 32 MB
- Antena con cable
- Bolsa campo acolchada
- Dispositivo de medición de HI
- Soporte de campo para el receptor
- Barra cinemática (sólo sistema dual)

Accesorios opcionales

- Kit de alimentación externa
- Cargador de batería de dos ranuras
- Receptor de baliza USCG/IALA

Certificado de emisiones

- Inmunidad (EN 55022 Clase B)
- Susceptibilidad (EN 50082-1)
- Certificación FCC y CE

Paquete de software de oficina

Levantamiento: Software GNSS Solutions

Funciones de software clave:

- Los cálculos integrados del sistema de cuadrícula y transformación permiten procesar, ajustar, comunicar y exportar posiciones de puntos en sistemas seleccionados o definidos por el usuario
- Datums predefinidos junto con funciones definidas por el usuario empleando el método de 7 parámetros para calcular y aplicar parámetros de transformación de datums
- Planificación de la misión de levantamiento
- Procesamiento automático de vectores
- Ajuste de red por mínimos cuadrados
- Herramientas de análisis de datos y control de calidad
- Transformaciones de coordenadas
- Informes
- Exportación
- Geoid 03

SIG: MobileMapper Office

Funciones de software clave:

- Editor de listas de entidades
- Creación de mapas de fondo
- Creación y edición de trabajos
- Corrección diferencial
- Visualización y edición de datos SIG
- Importación/exportación SIG: Importación/exportación de ESRI .SHP, MapInfo .MIF y Autodesk .DXF, y exportación de .CSV

Requisitos del sistema

- Windows® 2000 / XP
- Pentium® 233 o superior
- Mínimo 64 MB RAM, se recomienda 128 MB
- 200 MB de espacio en disco necesarios para la instalación

¹ El impacto de la tecnología "Prism" variara, de acuerdo a las condiciones de los satélites y pudiera no ser aplicada todo el tiempo, en todas las zonas del mundo.

² Pueden aplicarse limitaciones basadas en la disponibilidad de caracteres. La localización es responsabilidad del distribuidor.

³ Los valores de rendimiento asumen un mínimo de 5 satélites, siguiendo los procedimientos recomendados en el manual del producto. Las zonas de elevada recepción múltiple, los valores altos del PDOP y los periodos de condiciones atmosféricas extremas pueden afectar al rendimiento. Especificaciones de precisión y TTFF basadas en pruebas realizadas en Nantes y Moscú. Las pruebas realizadas en diferentes ubicaciones y en diferentes condiciones pueden generar resultados distintos.

A.1.2. GlobalSat ET-332

A continuación se incluye la información referente al receptor GlobalSat modelo ET-332 utilizado para la observación de vectores utilizando únicamente observable de código. El presente documento ha sido extraído directamente del fabricante.



Figura A.1: Fotografía del receptor GlobalSat modelo ET-332.



環天衛星科技股份有限公司

PRODUCT USER MANUAL

GPS ENGINE BOARD

ET-332

GlobalSat Technology Corporation

台北縣中和市建一路 186 號 16 樓(遠東世紀廣場)

16, No.186,Chien 1 Road, 235Chung Ho City,Taipei Hsien, Taiwan ,R.O.C.

Tel: 886-2-8226-3799(Rep.)

Fax: 886-2-8226-3899

Web: www.globalsat.com.tw

E-mail: service@globalsat.com.tw

Features:

SiRF star high performance GPS Chip Set
Very high sensitivity (Tracking Sensitivity: -159 dBm)
Extremely fast TTFF (Time To First Fix) at low signal level
Compact size (40.5mm * 35 mm * 10mm) suitable for space-sensitive application
Support NMEA 0183 and SiRF binary protocol
Build-in SuperCap to reserve system data for rapid satellite acquisition.
Cold start under 40 seconds, average
Hot start under 1 seconds, average

Specification:

General

Chipset	SiRF Star
Frequency	L1, 1575.42 MHz
C/A code	1.023 MHz chip rate
Channels	20 channel all-in-view tracking
Sensitivity	-159 dBm

Accuracy

Position	10 meters, 2D RMS 5 meters, 2D RMS, WAAS enabled
Velocity	0.1 m/s
Time	1us synchronized to GPS time

Datum

Default	WGS-84
---------	--------

Acquisition Time

Reacquisition	0.1 sec., average
Hot start	1 sec., average
Warm start	38 sec., average
Cold start	42 sec., average

Dynamic Conditions

Altitude	18,000 meters (60,000 feet) max
Velocity	515 meters /second (1000 knots) max

Acceleration Less than 4g
Jerk 20m/sec **3

Power

Main power input 3.8V ~ 6.5V DC input
Power consumption 75mA (Continuous mode)
 30mA (Trickle power mode)

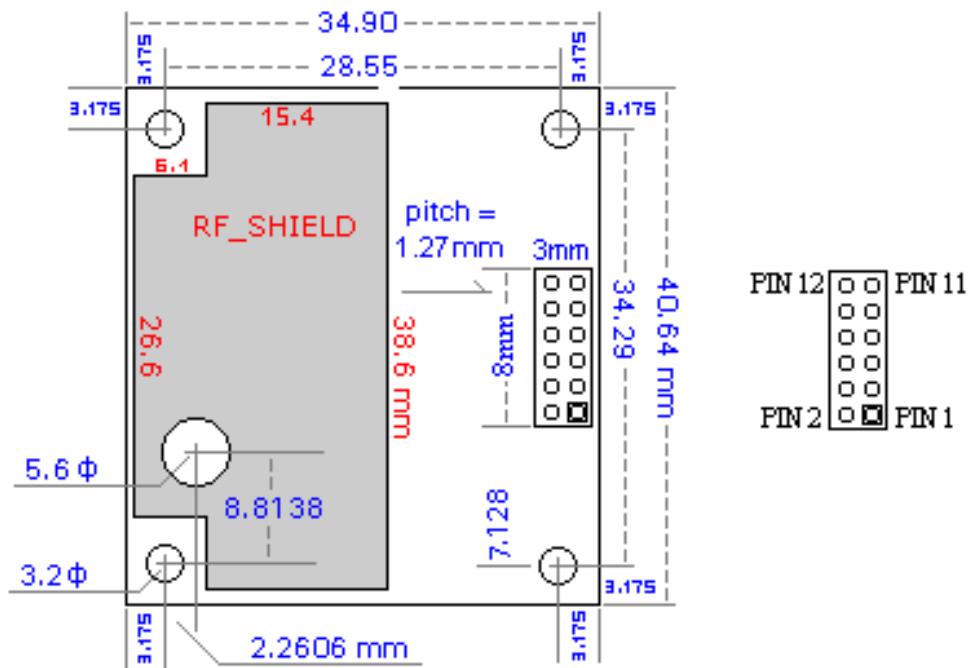
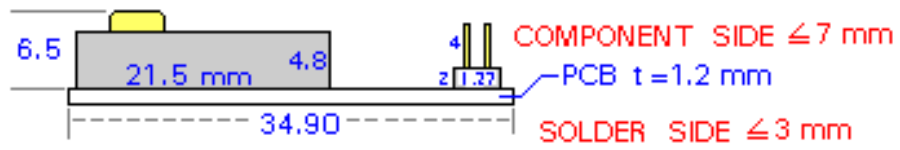
Interface

Baud rate 4,800 to 57,600 bps adjustable
Output message SiRF binary or
 NMEA 0183 GGA, GSA, GSV, RMC, VTG, GLL

Environmental

Operating Temp -40 to +85

Physical Characteristics



Interface Connection

*** Pin-out of the 12-pin interface connector**

Pin Number	Name	Description	Type
1	GND	Ground	
2	VBAT	Backup Battery	Input
3	VDC	3.8V~5.5V DC Power Input	Input
4	PBRES	Push Button Reset Input (Active Low)	Input
5	GPIO1	(Reserved)	
6	TXA	Serial Data Output A (GPS Data)	Output
7	RXA	Serial Data Input A (Command)	Input
8	GND	Ground	
9	GND	Ground	
10	SELECT	(Reserved)	
11	TIMEMARK	1PPS Time Mark Output	Output
12	GND	Ground	

Interface description

*** VDC (DC power input):**

This is the main DC supply for a 3.8V ~ 5.5V power module board.

*** VBAT (Backup battery):**

This is the battery backup input that powers the SRAM and RTC when main power is removed. Typical current draw is 10uA. Without an external backup battery, the module/engine board will execute a cold start after every turn on. To achieve the

faster start-up offered by a hot or warm start, a battery backup must be connected. To maximize battery lifetime, the battery voltage should be between 2.5v and 3.6v.

*** PBRES (Push button reset):**

This pin provides an active-low reset input to the engine board. It causes the engine board to reset and start searching for satellites.

*** SELECT :**

Do not connect.

*** TXA :**

This is the main transmits channel for outputting navigation and measurement data to user' s navigation software or user written software.

Output TTL level , 0V ~ 2.85V

*** RXA :**

This is the main receive channel for receiving software commands to the engine board from SiRFdemo software or from user written software.

Normally this pin must be kept in high, and if you don' t use this pin please connect a resistor to pull high.

*** Time mark :**

This pin provides one pulse-per-second output from the engine board that is synchronized to GPS time.

*** GND :**

GND provides the ground for the engine board. Connect all grounds.

A.1.3. Trimble ACEII

A continuación se incluye la información referente al receptor Trimble modelo ACEII utilizado para la observación de vectores utilizando únicamente observable de código. El presente documento ha sido extraído directamente del fabricante.

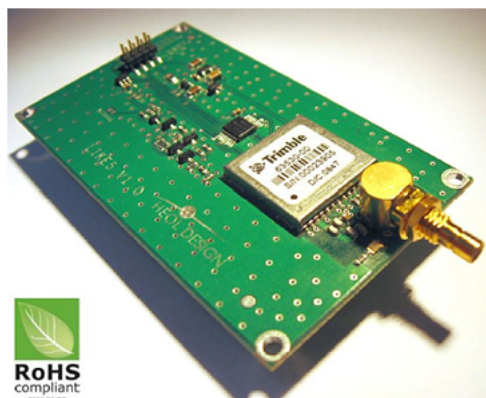


Figura A.2: Fotografía del receptor Trimble modelo ACEII.

ACE II GPS™

System Designer Reference Manual

Part Number: 36916-00

Firmware: 7.68

Date: June 1998

*Trimble Navigation Limited
Software and Component Technologies
645 North Mary Avenue
Post Office Box 3642
Sunnyvale, CA 94088-3642
U.S.A.*

*+1-800-827-8000 in North America
+1-408-481-8000 International
FAX: +1-408-730-2082*

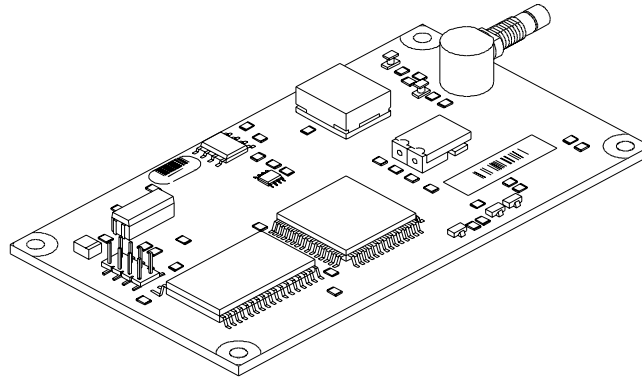


Figure 1-2. Receiver Module



Note – The receiver included in the Starter Kit contains a socket for the firmware ROM. This socketed board may be used to evaluate future releases of firmware. The standard OEM module is not equipped with a socket.

The interface motherboard includes a 9 to 32 VDC switching power supply which provides a regulated +5 VDC to the receiver. It also converts the TTL-level I/O to RS-232 for a direct interface to a computer. The motherboard provides an open-collector interface for the PPS and also includes a 3.6V lithium backup battery enabling lightning-fast hot starts. The Starter Kit includes an AC/DC converter for powering the module from an AC wall socket. The metal enclosure (see Figure 1-3) provides 2 interface port connectors, an antenna connector and a power connector. The mounting plate is secured to the metal enclosure with four screws. The eight pin header on the receiver module plugs into the corresponding 8-pin socket on the motherboard.

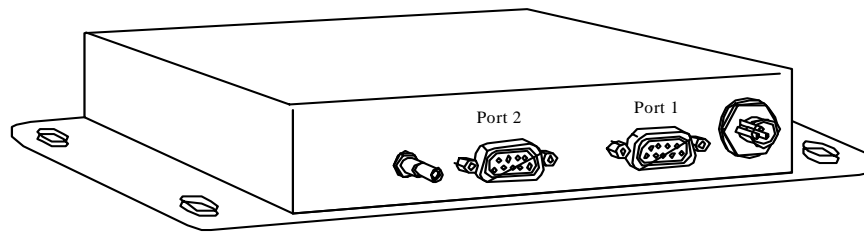


Figure 1-3. Starter Kit Interface Unit

1.2.1 Starter Kit Serial Port Interface

The GPS receiver is a DCE (Data Communication Equipment) device. To connect to a host computer, or DTE (Data Terminal Equipment) device, use a straight through cable. To connect a Differential Radio (DCE device) to the receiver (DCE Device) use a cross over cable or null modem cable.

Table 1-4. Serial Port Pinouts

Port 1	
Pin	Description
1	NC
2	TX
3	RX
4	NC
5	GND
6	NC
7	NC
8	NC
9	PPS Out

Port 2	
Pin	Description
1	NC
2	TX
3	RX
4	NC
5	GND
6	NC
7	NC
8	NC
9	PPS Out

The Starter Kit interface unit provides a PPS signal on Pin 9. The circuit below will provide a fifty percent duty cycle on the PPS line.

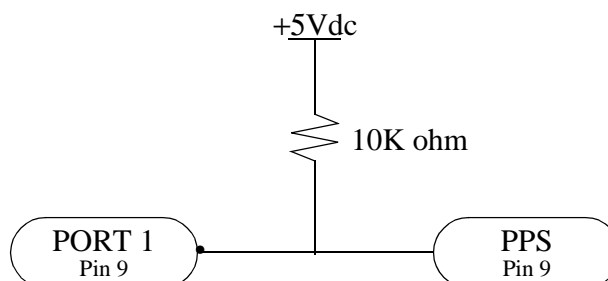


Figure 1-4. Open Collector PPS

Note – Due to the open-collector interface, the polarity of the PPS signal is inverted. The pulse is a 10 μ s negative-going pulse with the falling edge synchronized to UTC. When removed from the motherboard, the receiver provides a TTL level, positive-going pulse. In order to pull up the 1pps, use a 10k pull up resistor as shown in the following illustration.

1.3 Antenna

The GPS antenna receives the GPS satellite signals and passes them to the receiver. Because the GPS signals are spread spectrum signals in the 1575 MHz range and do not penetrate conductive or opaque surfaces, the GPS antenna must be located outdoors with a clear view of the sky. The ACE GPS requires an *active* antenna. The received GPS signals are very low power, approximately -140 dB, at the surface of the earth. Trimble's active antennas include a preamplifier that filters and amplifies the GPS signals before delivery to the receiver.

Trimble offers a variety of antennas for use with the ACE GPS. The compact magnetic mount GPS antenna and integral cable supplied with the Starter Kit is ideal for portable and mobile applications. A permanent, bulkhead mount antenna is also available. A compact, pole-mount rooftop antenna is available for fixed-site installations. Refer to Appendix F for mechanical outline drawings of the GPS antennas.



Warning – When magnetic-mount or permanent-mount GPS antennas are installed on a metal surface for prolonged periods, care must be taken to insulate the antennas in order to prevent galvanic corrosion.

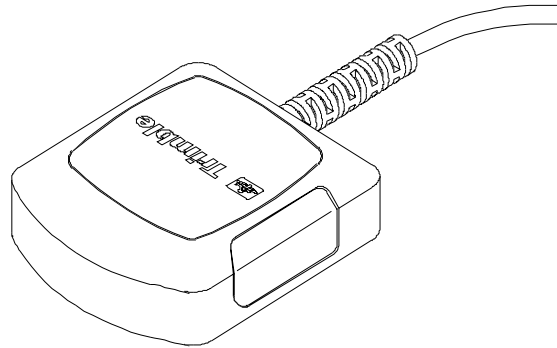


Figure 1-5. Magnetic Mount GPS Antenna

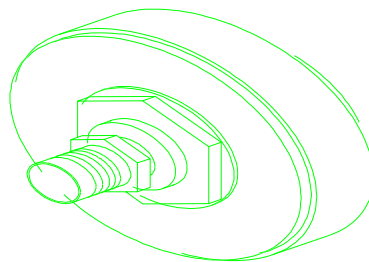


Figure 1-6 Hard Mount GPS Antenna

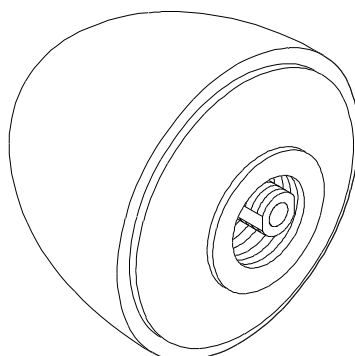


Figure 1-7. Bullet II GPS Antenna

1.4 Power

The receiver module is designed for embedded applications and requires a regulated +5.0 VDC input (+4.75 to +5.25 VDC). See *Power Requirements* in Chapter 2 for detailed specifications. In the Starter Kit, the motherboard includes a DC power regulator which converts a 9 to 32 VDC input to the regulated 5 VDC required by the module. Power can be applied to the Starter Kit module using one of two options: the DC power cable (see Figure 1-8) or the AC/DC power converter (see Figure 1-9).

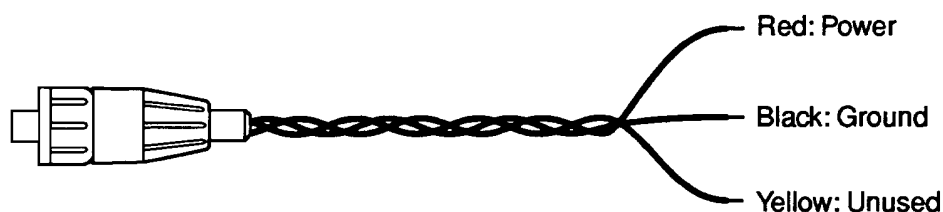


Figure 1-8. DC Power Cable

The DC power cable is ideal for bench-top or automotive testing environments. The power cable is terminated at one end with a 3-pin plastic connector which mates with the power connector on the metal enclosure. The unterminated end of the cable provides easy connection to a DC power supply. Connect the red power lead to a source of DC positive +9 to +32 VDC, and connect the black power lead to ground. This connection supplies power to both the receiver module and the antenna. The combined power consumption of the receiver module and the antenna is 200 milli-amps.



Note – The yellow wire is not used in the Starter Kit. Battery back-up is provided by a factory installed 3.6V lithium battery on the motherboard.

The AC/DC power converter may be used as an alternate power source for the Starter Kit module. The AC/DC power converter converts 110 or 220 VAC to a regulated 12 VDC compatible with the Starter Kit module. The AC/DC power converter output cable is terminated with a 3-pin connector compatible with the power connector on the metal enclosure. The AC power cable is not provided in the kit, since this cable is country-specific. The input connector is a standard 3-prong connector used on many desktop PCs.

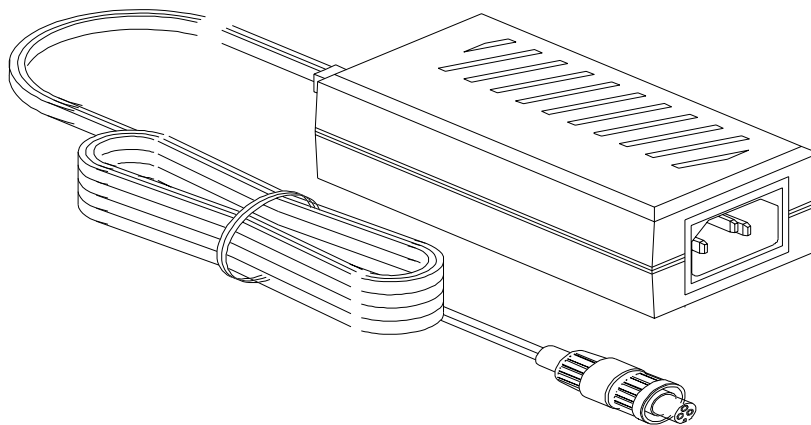


Figure 1-9. AC/DC Power Converter

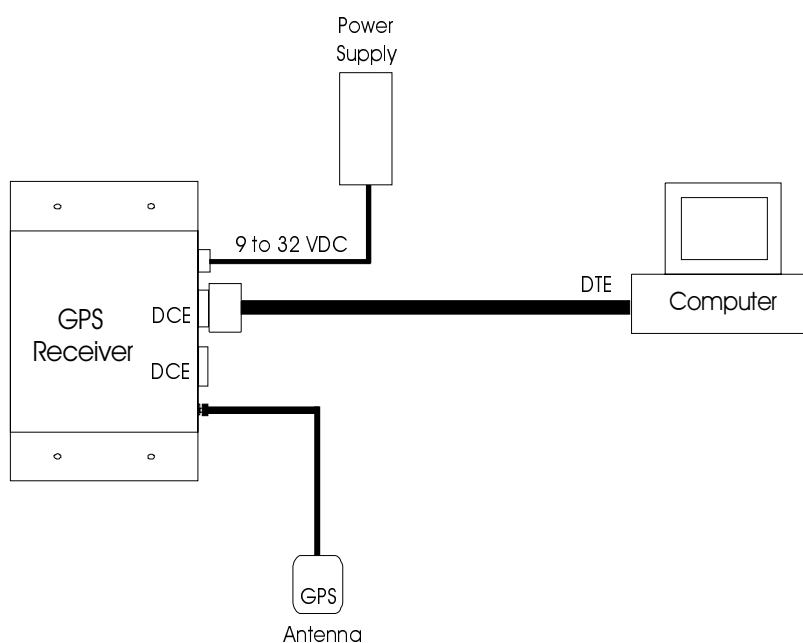
1.5 Hardware Setup

The ACE GPS supports TSIP, TAIP, and NMEA protocols. Port 1 is used for TSIP or TAIP I/O and port 2 is used to input RTCM SC-104 corrections and output NMEA messages. Follow the steps below to setup the Starter Kit. Figure 1-10 illustrates the setup.

1. For TSIP or TAIP protocols, connect one end of the 9-pin serial interface cable to Port 1 (or Port 2 to view NMEA data) of the receiver module. Connect the other end of the cable to COM1 or COM2 on a PC. A 9-pin-to-25-pin adapter may be required for the serial interface connection to a PC, if your PC has a 25-pin communication port.
2. Connect the antenna cable to the interface unit. This connection is made by pushing the antenna cable connector onto the SMB connector on the unit (to remove the antenna cable, simply pull the antenna connector off of the SMB connector). Place the antenna so that it has a clear view of the sky.
3. Using either the DC power cable or AC/DC power converter, connect to the 3-pin power connector on the interface unit.
 - DC Power Cable — Connect the terminated end of the power cable to the power connector on the interface unit. Connect the red lead to DC positive voltage (+9 to +32 VDC) and black power lead to DC ground. The yellow wire is not used. Switch on the DC power source.

- AC/DC Power Converter — Connect the output cable of the converter to the 3-pin power connector on the interface unit. Using the appropriate 3-prong AC power cable (not provided), connect the converter to an AC wall socket (110 VAC or 220 VAC). The AC power cable is not provided in the Starter Kit.

Figure 1-10. Interconnect Diagram



1.6 Running the TSIPMonitor32 Interface Program

The Starter Kit includes a disk containing TSIP interface programs which run on a PC-DOS platform, as well as Windows 95/NT platforms. These programs aid system integrators in monitoring the receiver module's performance and in developing the software interface for the GPS module. The TSIP programs are described in detail in Appendix B, TSIP User's Guide.

1. Connect one end of the serial interface cable to Port 1 of the Starter Kit interface unit. Connect the other end of the cable to the serial port of your PC.
2. Turn on the DC power source or plug in the AC/DC converter.
3. Insert the GPS Tool Kit disk in the disk drive.
4. Refer to the Readme.txt file for complete instructions.
5. The TSIPMonitor32 program may be run directly off the diskette or the entire contents of the diskette may be copied onto your computer's hard drive. To run the program off the diskette, type A:TSIPMonitor32.exe.

6. Once the TSIPMonitor32 screen appears, the lower left hand screen will display the TX and RX status. If the receiver is communicating to the host software, a blinking green status will appear depending if the receiver is sending a command, or transmitting a report.
7. Once a GPS antenna is connected to a receiver and the receiver has achieved a position fix, the transmitted position reports will be displayed in the position field, as well as time, velocity, satellites tracked, and GPS receiver status. The receiver will send a health report every few seconds, even when no satellites are being tracked.

If the TSIPMonitor32 program displays a question mark (?), the receiver has not reported a status for this field. If the ? never disappears in the data field, then the GPS module may not be communicating with the computer. If this occurs, re-check the interface cable connections and verify the serial port selection. If the communication failure still occurs after checking all connections and settings, please call the Trimble Technical Assistance Center (TAC) for assistance. 1 800 481-8000 ext.8527.

F ACE II GPS Specifications and Mechanical Drawings

The ACE II GPS module is designed for embedded industrial computing or control, mobile computing or data collection, precision timing, and vehicle tracking applications. This appendix includes the system specifications and mechanical drawings for the ACE II GPS receiver module and the miniature magnetic mount GPS antenna.

F.1 GPS Receiver

F.1.1 General

- L1 frequency (1575.42 MHz), C/A code (Standard Positioning Service), 8-channel, continuous tracking receiver, 32 correlator

F.1.2 Accuracy

Position 25 meters CEP (Circular Error Probability) (50%) without SA (Selective Availability)

- Velocity 0.1 m/sec. (1 Sigma) steady state conditions (without SA)
- Time available UTC to nearest microsecond with 1 pulse per second

F.1.3 DGPS Accuracy

- Position 2 meters CEP (50%)
- Velocity 0.05 m/sec. (1 Sigma) steady state conditions
- Time ± 500 nanosecond (nominal)

F.1.4 Datum

- WGS-84 (standard DMA datum set)

F.1.5 Acquisition Rate

- Cold Start <3 minutes (90%)
- Warm Start <45 seconds (90%)
- Hot Start <20 seconds (90%)

F.1.6 Dynamics

- Altitude -1000 m to +18,000 m
- Velocity 515 m/sec. (maximum)
- Acceleration 4g (39.2 m/sec.²)
- Jerk 20 m/sec.³

F.2 Environmental Characteristics

F.2.1 Temperature

- Receiver board: Operating, -40^oC to +85^oC
Storage, -55^oC to +100^oC

F.2.2 Vibration

- 0.008g²/Hz 5Hz–20 Hz
- 0.05g²/Hz 20Hz–100Hz
- -3dB/octave 100Hz–900Hz
- Specifications comply with SAE J1211 requirements

F.2.3 Altitude

- -400 to +18,000 meters MSL

F.2.4 Humidity

- 95% R.H. non-condensing @ +60^oC

F.3 Physical Characteristics

F.3.1 Size

- Receiver board: 82.6 mm x 46.5 mm x 14.9 mm (3.25" x 1.83" x 0.587")

F.3.2 Weight

- Receiver board: 28.3 g (1.0 oz) without optional shield

F.3.3 Power

- Prime Power: +5 volts DC ($\pm 5\%$); 175 ma (.88 watts typical) without antenna
- RAM Backup: optional +3.2 - +5.25 volts DC input via 8-pin header J3; 1 micro amp

F.4 Input/Output

F.4.1 Interface

- Two TTL level, bi-directional, serial I/O ports on J3 8-pin header

F.4.2 Protocols Available

- Trimble Standard Interface Protocol (TSIP); binary data I/O provides maximum bi-directional control over all GPS board functions. Sample C source code interface routines are available.
- Trimble ASCII Interface Protocol (TAIP); ASCII message data for I/O control over a serial communication link.. Controls scheduled and polled responses from the GPS receiver. Sample C source code interface routines are available.
- NMEA 0183: Industry standard ASCII protocol for marine electronics applications. Supports NMEA sentences GGA, VTG, GLL, ZDA, and GSV, GSS, RMC.



Note – GGA and VTG are factory default messages.

F.5 Pulse Per Second

F.5.1 Timing

- Rising edge of pulse synchronized to UTC within 100 ns, nominal

F.5.2 Pulse Width

- 10 microsecond wide pulse; rising edge is 20 nanoseconds or less, depending upon distributed capacitance in cable

F.5.3 Output

- TTL level signal

F.5.4 Electrical

- Operating Frequency: 16.368 MHz
- Crystal Frequency: 12.504 MHz, Fundamental Mode
- Tolerance: ± 1 ppm @ room temp
- Temperature stability: 2.5 ppm /°C

F.5.5 Environmental

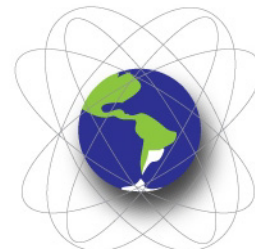
- Temperature: Operational -40°C to +85°C
Storage -55°C to +105°C
- SMD Device Reflow ± 0.5 ppm max change after 240°C for 20 seconds
- Shock: ± 0.5 ppm max change after 5000G 6 msec .5 sine
- G Sensitivity: ± 0.1005 ppm max per G
- Vibration: ± 0.5 ppm max change — $0.008g^2/Hz$ to 20Hz
 ± 0.5 ppm max change — $0.05g^2/Hz$ to 100Hz
-3 dB/octave — 100Hz to 900 Hz

F.5.6 Mechanical

- Electrodes: Gold
- Markings on Top: 5-digit Crystal Frequency
Manufacturer Name or Logo
Date Code or Lot Number

A.2. Información sobre las estaciones permanentes RAMSAC

A continuación se transcribe la información referente a las estaciones permanentes IGM1 y MA02. Las mismas fueron utilizadas para el procesamiento con fase y código de las observaciones realizadas sobre la micro red geodésica FIUBA.



Formulario de Información de la Estación GPS Permanente IGM1

1. FORMULARIO.

Preparado por: Instituto Geográfico Nacional de Argentina.
Creado: 5 de septiembre de 2007.
Actualización: 1 de diciembre de 2009.

2. INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN GPS.

Nombre de la Estación: Instituto Geográfico Militar.
Identificación de la Estación: IGM1.
Código Internacional: 41505M003.
Información Adicional: Esta estación pertenece a la Red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas).
Institución a cargo del mantenimiento: Instituto Geográfico Nacional.
Responsable del mantenimiento: Sergio Cimbaro / Diego Piñón
e-mail: scimbaro@ign.gob.ar / dpinon@ign.gob.ar
Propietario del instrumento: Universidad de Memphis.

3. INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIZACIÓN.

Provincia: Buenos Aires.
Ciudad: Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
Tipo de Monumentación: Antena montada sobre trípode de acero inoxidable empotrado en la estructura de hormigón armado del edificio.



4. COORDENADAS.

Geodésicas:

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 07 (Época 2006.632)			
Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal [m]	Cota [m]
34° 34' 20.07733" S	58° 26' 21.54958" W	50.694	34.555

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 94 (Época 1993.800)			
Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal [m]	Cota [m]
34° 34' 20.0992" S	58° 26' 21.5510" W	50.148	34.555

Cartesianas:

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 07 (Época 2006.632)					
X [m]	Y [m]	Z [m]	Vx [m/año]	Vy [m/año]	Vz [m/año]
2751804.0436	-4479879.3087	-3598922.5109	0.0029	-0.0063	0.0088

Errores en metros: $\sigma_x = \pm 0.005$, $\sigma_y = \pm 0.005$, $\sigma_z = \pm 0.005$

5. INFORMACIÓN DEL EQUIPAMIENTO GPS.

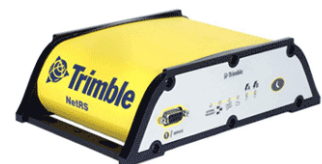
Receptor 1:

Modelo: Ashtech Micro-Z.
Código IGS: ASHTECH UZ-12.
Nº de Serie: ZR20012102.
Versión de Firmware: CJ00.
Fecha de Instalación: 17 de diciembre de 2003.



Receptor 2:

Modelo: Trimble NetRS.
Código IGS: TRIMBLE NETRS.
Nº de Serie: 4612261955.
Versión de Firmware: 1.1-5.
Fecha de Instalación: 6 de octubre de 2006.



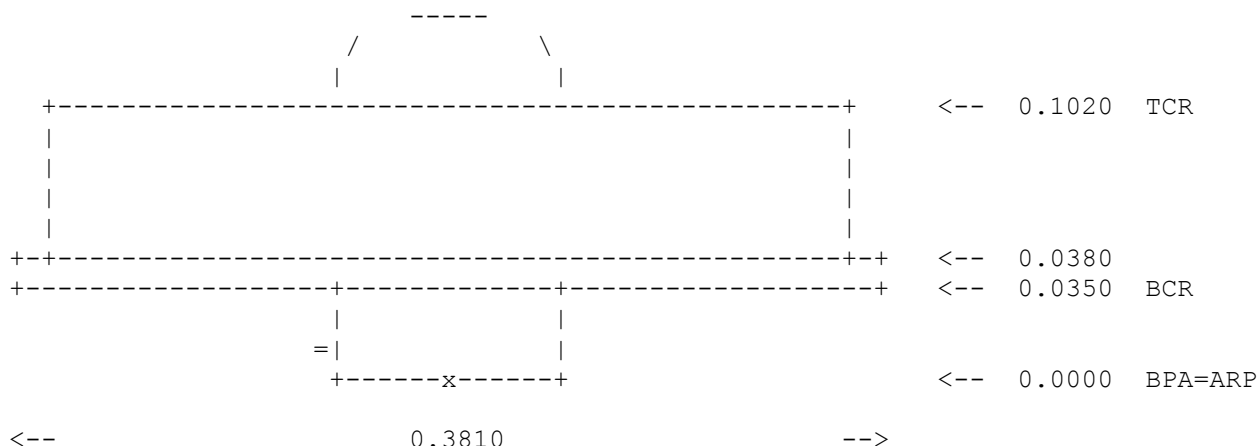
Antena:

Modelo: Ashtech Dorne Margolin, Radome.
Código IGS: ASH700936D_M SNOW
Nº de Serie:
Altura de Antena [m]: 0.000 (Referida al A.R.P. – Antenna Reference Point).
Fecha de Instalación: 23 de enero de 2004.



6. ESQUEMA DE ANTENA.

ASH700936D_M SNOW



DIMENSIÓN [mm]	REFERENCIA
90.97	Distancia del punto de referencia de la antena (ARP), al centro de fase de frecuencia L1.
120.23	Distancia del punto de referencia de la antena (ARP), al centro de fase de frecuencia L2.

Las correcciones a los centros de fase son absolutas y han sido extraídas del archivo de calibración IGS05 de la semana 1552.

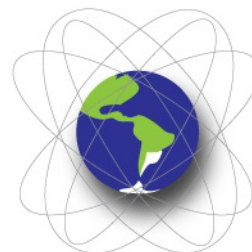
7. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA.

Observables: L1, L2, C1, P2, D1, S1, S2.
Intervalo de Registro: 1, 5 y 15 segundos.
Ángulo de Máscara: 3°.
Formato de Archivo: Rinex, compactado en formato Hatanaka.
Servidor de Búsqueda: <http://www.ign.gob.ar/DescargaRamsac>

8. INFORMACIÓN ADICIONAL.

Para información técnica contactar a:

Nombre: Agrim. Sergio R. Cimbaro – Geodesia – Instituto Geográfico Nacional.
Dirección: Av. Cabildo N° 381 – C1426AAD – Ciudad Autónoma de Bs.As. – Argentina.
Teléfono: (011) 4576-5576 Int.128.
Fax: (011) 4576-5529.
E-mail: scimbaro@ign.gob.ar



Formulario de Información de la Estación GNSS Permanente MA02

1. FORMULARIO.

Preparado por: Instituto Geográfico Nacional de Argentina.
Creado: 3 de marzo de 2010.
Actualización: 3 de marzo de 2010.

2. INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN GPS.

Nombre de la Estación: Mertind Argentina 02.
Identificación de la Estación: MA02.
Código Internacional: 41505M004.
Información Adicional:
Institución a cargo del mantenimiento: Mertind Argentina.
Responsable del mantenimiento: Jerónimo Dalla Vía
e-mail: jeronimodallavia@mertind.com
Propietario del instrumento: Mertind Argentina.

3. INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIZACIÓN.

Provincia: Buenos Aires.
Ciudad: Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
Tipo de Monumentación: Antena montada sobre pilar de hormigón armado apoyado en la terraza de un edificio.



4. COORDENADAS

Geodésicas:

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 07 (Época 2006.632)			
Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal [m]	Cota [m]
34° 36' 25.28333" S	58° 23' 38.71695" W	59.656	
MARCO DE REFERENCIA POSGAR 94 (Época 1993.800)			
Latitud	Longitud	Altura Elipsoidal [m]	Cota [m]

Cartesianas:

MARCO DE REFERENCIA POSGAR 07 (Época 2006.632)					
X [m]	Y [m]	Z [m]	Vx [m/año]	Vy [m/año]	Vz [m/año]
2754195.7499	-4475846.4129	-3602103.8398	-	-	-

Errores en metros: $\sigma_x = \pm 0.005$, $\sigma_y = \pm 0.005$, $\sigma_z = \pm 0.005$

5. INFORMACIÓN DEL EQUIPAMIENTO GPS.

Receptor:

Modelo: Sokkia GSR2700 RSX.
Código IGS: SOK GSR2700 RSX.
Nº de Serie: SZZ07380162.
Versión de Firmware: 3.500.
Fecha de Instalación: 26 de enero de 2010.



Antena:

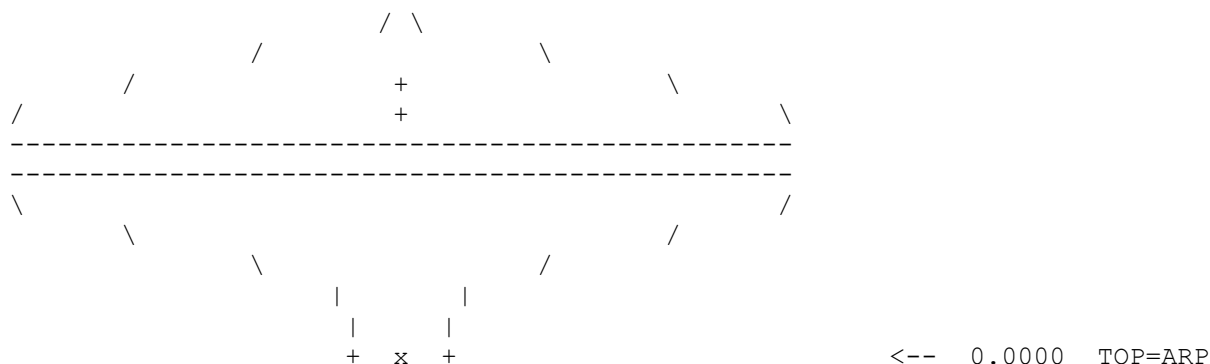
Modelo: Novatel SK702-GG GNSS Pinwheel.
Código IGS: NOV702GG.
Nº de Serie: NAE07500007.
Altura de Antena [m]: 0.040 (Referida al A.R.P. – Antenna Reference Point).
Fecha de Instalación: 26 de enero de 2010.



6. ESQUEMA DE ANTENA.

NOV702GG

NONE



DIMENSIÓN [mm]	REFERENCIA
66.76	Distancia del punto de referencia de la antena (ARP), al centro de fase de frecuencia L1.
66.08	Distancia del punto de referencia de la antena (ARP), al centro de fase de frecuencia L2.

Las correcciones a los centros de fase son absolutas y han sido extraídas del archivo de calibración IGS05 de la semana 1552.

7. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA.

Observables: L1, L2, C1, P2, D1, D2, S1, S2.
Intervalo de Registro: 1, 5 y 15 segundos.
Ángulo de Máscara: 5°.
Formato de Archivo: Rinex, compactado en formato Hatanaka.
Servidor de Búsqueda: <http://www.ign.gob.ar/DescargaRamsac>

8. INFORMACIÓN ADICIONAL.

Para información técnica contactar a:

Nombre: Agrim. Sergio R. Cimbaro – Geodesia – Instituto Geográfico Nacional.
Dirección: Av. Cabildo N° 381 – C1426AAD – Ciudad Autónoma de Bs.As. – Argentina.
Teléfono: (011) 4576-5576 Int.128.
Fax: (011) 4576-5529.
E-mail: scimbaro@ign.gob.ar

A.3. Generación de RINEX a partir de protocolos propietarios

Durante los comienzos del trabajo de tesis, se había originalmente optado por capturar la salida de datos de cada receptor utilizado mediante una aplicación especialmente diseñada para convertir dichos datos en archivos RINEX. Para ello, se utilizó la información disponible sobre el protocolo SiRF Star III, soportado por el receptor GlobalSat.

Para realizar la labor antes mencionada, se desarrolló una aplicación cuya captura de pantalla se reproduce a continuación:

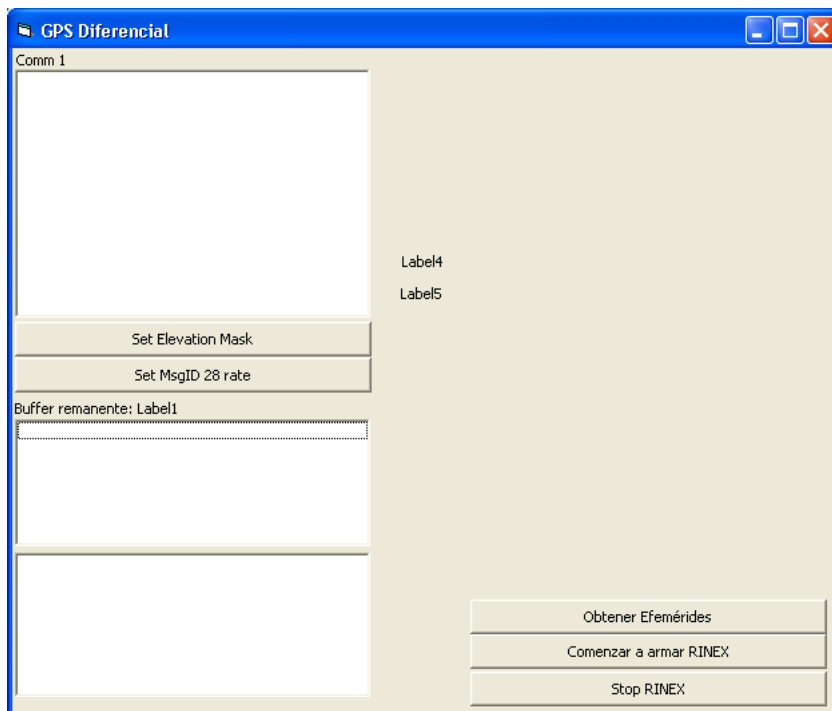


Figura A.3: Aplicación desarrollada para conversión de protocolo SiRF a RINEX.

Para el mencionado desarrollo, fue necesaria la información extraída de los manuales denominados *SiRF Binary Protocol Reference Manual* así como también la información proveniente de las especificaciones RINEX.

La intención original del autor fue otorgar un conjunto de herramientas que permitieran realizar en forma absolutamente independiente observaciones de vectores en código C/A. Debido a la presencia en el mercado de muchas variantes y versiones del mencionado protocolo (SiRF), se decidió entonces obtener una herramienta que agilizará el proceso de captura de datos de diferentes versiones de dicho protocolo. Para ello, se solicitó la asistencia de *Helenav*, una empresa de desarrollos para navegación sita en Holanda¹. De forma absolutamente desinteresada, el Ing. Leonard Hylke, fundador de dicha empresa, contribuyó con una licencia gratuita de una aplicación de consola para *Windows* que permite convertir la salida de un receptor con protocolo SiRF a RINEX.

El comando utilizado para la conversión es:

¹Para más información visite la página de Internet <http://www.helenav.nl/>

```
sifrin sirfrin1.srf > sirfrin.obs
```

Dicha aplicación permitió emplear más tiempo en el desarrollo y prueba de algoritmos de procesamiento que en el desarrollo de programación dispuesta para la obtención de archivos RINEX en base a datos SiRF.

Algo similar ocurrió con el protocolo TSIP utilizado por los receptores *Trimble*. La diferencia sustancial fue que la traducción de archivos con contenido TSIP a RINEX está soportada por la herramienta llamada *TEQC - The Toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS Data*. Dicha herramienta gratuita fue desarrollada por UNAVCO² y permite rápida y fácilmente la traducción de TSIP a formato RINEX.

En este caso, el comando para convertir un archivo capturado desde una salida TSIP a RINEX es:

```
teqc -tr tsip_6f archivo_de_entrada > archivo_salida.??O
```

Los signos ?? deberán reemplazarse con los últimos dos dígitos del año de realización de las observaciones.

Es importante aclarar, que en ninguno de los dos casos antes mencionados, se obtiene con dichas herramientas el archivo de navegación RINEX. Para obtener el mismo puede acudir a la página del Instituto Geográfico Nacional, en la sección de descargas de archivos RINEX.

²University NAVSTAR Consortium <http://www.unavco.org/unavco.html>

Anexo B

Utilización de la aplicación desarrollada

Durante el desarrollo de este anexo, se entregará al lector una guía rápida de utilización de la aplicación programada durante el transcurso de este trabajo de tesis.

En la figura B.1 se presenta la pantalla principal de la aplicación. La misma está dividida en 3 secciones claramente diferenciadas: archivo base, archivo a procesar y resultados del procesamiento.

The screenshot shows a software window titled "Nuevo Proyecto - FIUBA.Diferencial". The interface is divided into three main sections:

- Archivo Base:** Contains a text field for "Directorio del archivo RINEX" with a "Cargar..." button. Below it are input fields for "ECEF X [m]", "ECEF Y [m]", and "ECEF Z [m]". To the right, there are fields for "Latitud", "Longitud", and "Altura elipsoidal", and a "Marker Name" field. A table with columns "Elemento" and "Valor" is present for "Datos observados".
- Archivo a procesar:** Similar to the first section, it has a "Directorio del archivo RINEX" field and "Cargar..." button. It includes fields for "ECEF X [m]", "ECEF Y [m]", and "ECEF Z [m]". To the right, there are fields for "Latitud", "Longitud", and "Altura elipsoidal", and a "Marker Name" field. A table with columns "Elemento" and "Valor" is present for "Datos observados". There are radio buttons for "Estático" (selected) and "Cinemático", and a "Opciones del procesamiento..." button.
- Resultados del procesamiento:** This section displays calculated values in a grid. Each value has a "Copiar" button next to it. The values are: ECEF X [m], ECEF Y [m], ECEF Z [m], Sigma X [m], Sigma Y [m], Sigma Z [m], Latitud, Longitud, Altura elipsoidal, Sigma Norte [m], Sigma Este [m], and Sigma Altura [m]. On the right side of this section, there are three buttons: "Ver residuos...", "Ver Ploteo sin filtrar...", and "Ver Ploteo filtrado...".

Figura B.1: Pantalla principal de la aplicación.

Para comenzar a utilizar la aplicación, deberá seleccionarse primero un archivo de observación RINEX para la base. Para ello, se deberá hacer clic en el botón "Cargar..." correspondiente

a la sección de archivo base. La ventana que se muestra en la figura B.2 aparecerá, permitiendo seleccionar el archivo deseado. El programa filtra cualquier otra extensión de archivo que no coincida con el formato de la extensión RINEX: dos últimos dígitos del año de observación más la letra O para el archivo de observación y N para el archivo de navegación.

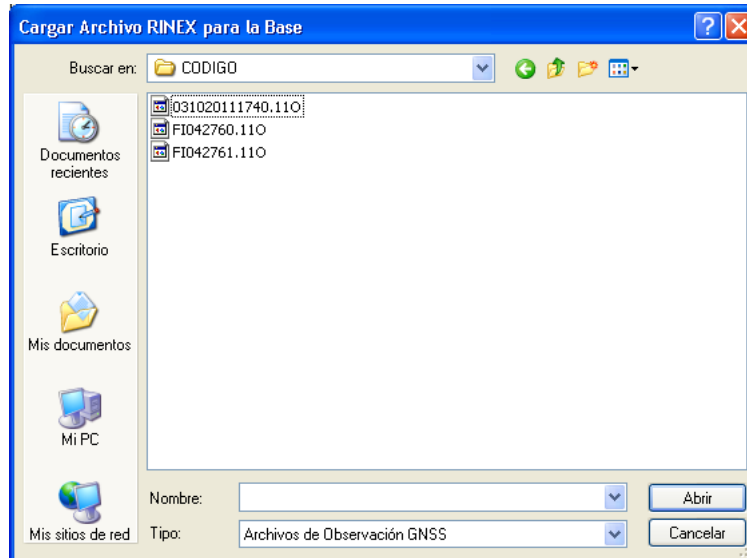


Figura B.2: Cuadro de diálogo para la carga de archivos RINEX.

En caso de no existir un archivo de navegación con el mismo nombre, pero con extensión ??N, el programa abrirá automáticamente otro cuadro de diálogo solicitando la selección del archivo de navegación correspondiente.

Una vez seleccionado el archivo para la base, deberá procederse a completar los datos de la misma. En algunos casos, los archivos RINEX ya contienen la información correspondiente al nombre del punto, latitud, longitud y altura. En ese caso, el programa cargará dichos datos automáticamente. Si estos datos no coincidieran con los reales, deberá cargarse la información solicitada, debiéndose prestar especial atención a las coordenadas del vértice base y la altura de la antena. Las coordenadas de la base pueden ingresarse tanto en forma geodésica, con sus componentes separadas por espacios, como en forma cartesiana. El usuario podrá observar el cambio de un sistema al otro al introducir las coordenadas.

Archivo Base				
Directorio del archivo RINEX				
D:\Agrimensura\Tesis\Observaciones de Campo\Tesis\276\IGM1\igm1276u.11o				Cargar...
ECEF X [m]	Latitud	Marker Name	Datos observados	
2751804.0436	-34 34 20.07733	IGM1	Elemento	Valor
ECEF Y [m]	Longitud	Marker Number	Primera observación	03/10/2011 20:00:00
-4479879.3087	-58 26 21.54958	41505M003	Última observación	03/10/2011 21:59:59
ECEF Z [m]	Altura elipsoidal	Altura de la antena	Épocas totales	7200
-3598922.5109	50.694	0.091	Intervalo de registro	1

Figura B.3: Sección archivo base completa.

Es importante mencionar que, en caso de omitirse la carga de una coordenada de buena

precisión para la base, el resultado del procesamiento podría ser inesperado, pudiéndose incluso registrar alguna inestabilidad de la aplicación al calcular coordenadas fuera de los rangos normales.

Por último, podrá también observarse información básica como, primera y última observación, épocas totales e intervalo de registro.

Para la carga del archivo a procesar, deberá seguirse el mismo procedimiento antes descrito con excepción de la carga de la coordenada. La misma es precisamente la incógnita a resolver por la aplicación. Justo antes de procesar la línea de base, la aplicación debería tener un aspecto parecido al siguiente:

Nuevo Proyecto - FIUBA.Diferencial

Procesar Vector Ver Línea de Base Acerca de...

Archivo Base

Directorio del archivo RINEX
D:\Agrimensura\Tesis\Observaciones de Campo\Tesis\276\IGM1\igm1276u.11o Cargar...

ECEF X [m]	Latitud	Marker Name	Datos observados	
2751804.0436	-34 34 20.07733	IGM1	Elemento	Valor
ECEF Y [m]	Longitud	Marker Number	Primera observación	03/10/2011 20:00:00
-4479879.3087	-58 26 21.54958	41505M003	Última observación	03/10/2011 21:59:59
ECEF Z [m]	Altura elipsoidal	Altura de la antena	Épocas totales	7200
-3598922.5109	50.694	0.091	Intervalo de registro	1

Archivo a procesar

Directorio del archivo RINEX
D:\Agrimensura\Tesis\Observaciones de Campo\Tesis\276\FI00\Codigo\FI002761.11O Cargar...

Elemento	Valor	Marker Name
Primera observación	03/10/2011 17:56:24	FI00
Última observación	03/10/2011 22:23:00	Marker Number
Épocas	14480	FI00
Intervalo de registro	1	Altura de la antena
		0.187

Estático Cinemático Opciones del procesamiento...

Resultados del procesamiento

ECEF X [m]	ECEF Y [m]	ECEF Z [m]	Copiar	Ver residuos...	
Sigma X [m]	Sigma Y [m]	Sigma Z [m]	Copiar		Ver Ploteo sin filtrar...
Latitud	Longitud	Altura elipsoidal	Copiar		Ver Ploteo filtrado...
Sigma Norte [m]	Sigma Este [m]	Sigma Altura [m]	Copiar		

Figura B.4: Aplicación lista para procesar línea de base.

Para procesar la línea de base, proceda a hacer clic sobre el botón de la barra superior de herramientas “Procesar Vector”. Si el procesamiento ha sido exitoso, se mostrará un mensaje indicándolo.

Los resultados del procesamiento se muestran en la última de las secciones en dos formatos diferentes: latitud, longitud y altura con sus correspondientes intervalos de confianza y X, Y, Z ECEF con sus correspondientes intervalos de confianza, tal como se muestra en la siguiente figura:

Resultados del procesamiento			
ECEF X [m]	ECEF Y [m]	ECEF Z [m]	
2754633.109	-4476951.297	-3600421.438	Copiar
Sigma X [m]	Sigma Y [m]	Sigma Z [m]	
0.525	0.706	0.681	Copiar
Latitud	Longitud	Altura elipsoidal	
-34 35 18.7788	-58 23 46.8221	67.638	Copiar
Sigma Norte [m]	Sigma Este [m]	Sigma Altura [m]	
0.817	0.376	0.655	Copiar

Figura B.5: Sección de resultados del procesamiento.

Haciendo clic sobre alguno de los botones copiar, permite enviar la información de la línea correspondiente al portapapeles del *Windows*.

B.1. Visualización rápida de los resultados

Es posible visualizar en forma rápida los puntos totales procesados (antes de los filtros de bondad de ajuste y 3 sigma) haciendo clic sobre el botón con la leyenda “Ver Ploteo sin Filtrar”. Esta visualización permite dar un vistazo rápido a los puntos obtenidos luego del procesamiento.

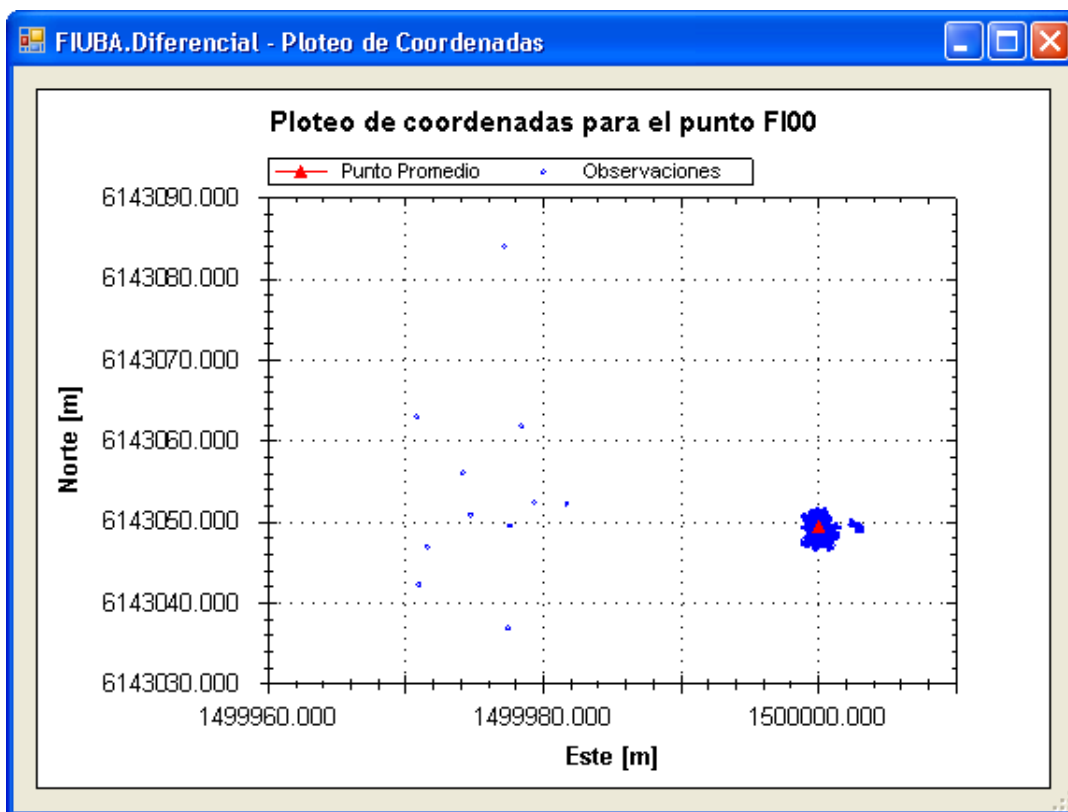


Figura B.6: Ploteo sin filtrar.

Para una correcta visualización, las coordenadas geodésicas obtenidas son proyectadas sobre una faja Gauss-Krüger con meridiano de tangencia arbitrario en el centro de la nube de

puntos obtenida. Esto permite además apreciar la dispersión de los datos obtenidos directamente en metros.

Esta misma visualización puede realizarse para los datos posteriores al filtro de bondad de ajuste y 3 sigma.

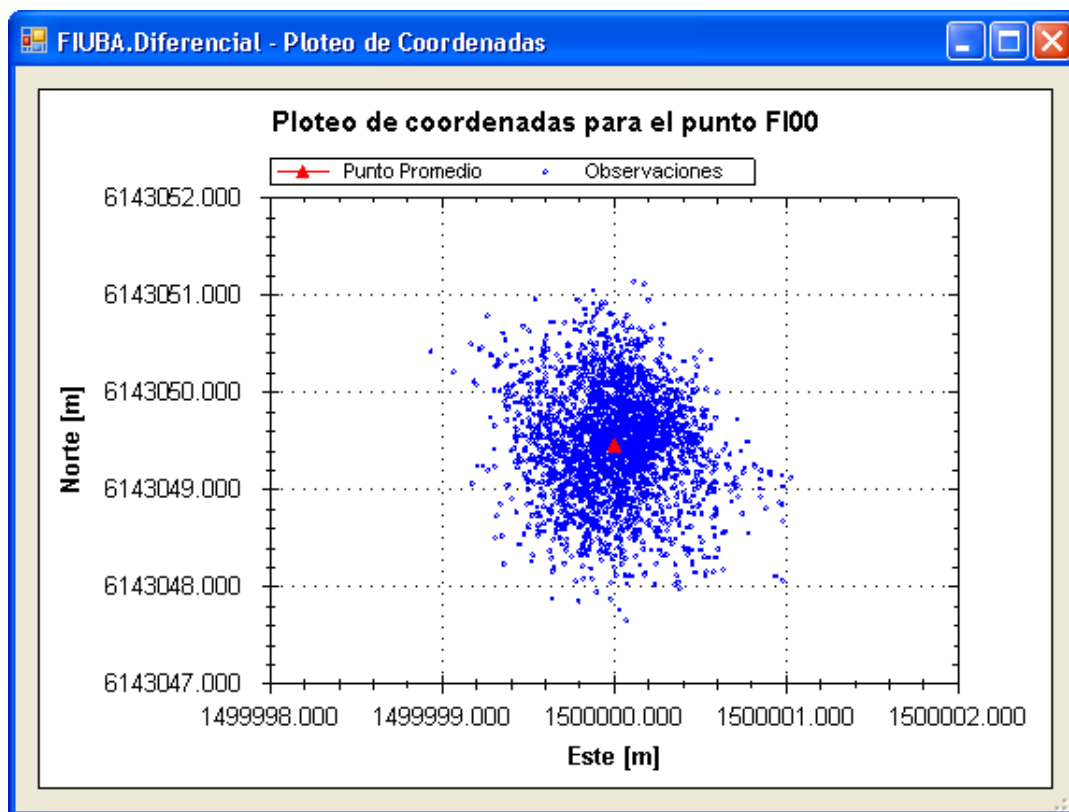


Figura B.7: Ploteo filtrado.

B.2. Exportación de resultados

Para un análisis más detallado, la aplicación entrega una salida completa de los vectores procesados (tanto filtrados como sin filtrar) haciendo clic en “Exportar puntos...” en la barra de herramientas.

Dicha exportación permite obtener en formato separados por comas (CSV) las coordenadas finales de los vectores procesados, tanto en formato geodésico, cartesiano y plano. También pueden exportarse los residuos de dobles diferencias en tres formatos diferentes para graficar utilizando aplicaciones como *Microsoft Excel* o *Generic Mapping Tools*.

El conjunto de datos obtenido puede ser exportado o salvado para un próximo post-proceso haciendo clic en “Guardar Procesamiento” en la barra de herramientas superior. El formato utilizado para almacenar la información es el conocido como *extensible markup language* o XML. El mismo puede ser leído e interpretado por cualquier aplicación compatible con este metalenguaje, tal como *Microsoft Internet Explorer* o *Mozilla Firefox*.

B.3. Utilización de las clases desarrolladas en VB.NET

Para el caso de requerirse utilizar las clases desarrolladas en otras aplicaciones, las mismas están diseñadas de modo de no requerir de la estructura completa del programa. El entorno de programación utilizado ha sido *Sharp Develop* utilizando el *Framework.NET* en su versión 4.0.

Algunas librerías externas de uso gratuito fueron utilizadas para el desarrollo, tanto para la aplicación completa, como para las clases obtenidas. A continuación se brinda la información referida a estas librerías:

- **Alglib2**: librería utilizada para el cálculo del valor de χ^2 . La misma presenta múltiples soluciones para programación de herramientas matemáticas. <http://www.alglib.net/>
- **ZedGraph**: librería de código abierto para generación de gráficos. <http://zedgraph.sourceforge.net/index.html>

Todas las clases destinadas a ser reutilizadas, están diseñadas de acuerdo a la concepción de objetos de programación de alto nivel, teniendo en varios casos sobrecarga en algunos procedimientos de creación de objetos. Dado que no es el objetivo de este trabajo la descripción completa de esta metodología de programación, se recomienda al lector consultar bibliografía referida al tema de programación orientada a objetos, o como se le conoce en inglés *object-oriented programming* (OOP).

Referencias

- BANCROFT, STEPHEN (1985). «An Algebraic Solution of the GPS Equations». *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*.
- BECERRA, GUADALUPE ESTÉBAN VÁZQUEZ (2008). *Analysis of stochastic properties of GPS observables*. Tesina o Proyecto, The Ohio State University.
- BIELENKI, CLÁUDIO JR. (2008). *Avaliação do uso de observáveis coletadas com receptores de navegação pessoal para determinação de coordenadas em linhas base curtas*. Tesina o Proyecto, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- ESTEY, LOU y GURTNER, WERNER (2007). *The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*. The Astronomical Institute of the University of Berne, UNAVCO.
- FERNÁNDEZ, CARLOS; GONZÁLEZ, ALEJANDRO RAMÍREZ y RUBIO, JUAN A. FERNÁNDEZ (2001). «IMPLEMENTACIÓN DE CORRECCIÓN DE PSEUDODISTANCIAS Y DEL ALGORITMO DE BANCROFT EN MATLAB PARA EL POSICIONAMIENTO PRELIMINAR EN GPS». *URSI 2001*.
- GHILANI, CHARLES D. y WOLF, PAUL R. (2006). *Adjustment Computations. Spacial data analysis*. John Wiley and Sons.
- GOVERNMENT, UNITED STATES y NAVSTAR (2006). *Navstar Global Positioning System Interface Specification*. ARINC Engineering Services, LLC.
- HERNANDO, LEYTON V. (2009). *Desarrollo, implementación y prueba de un filtro de Kalman del tipo UKF para un vehículo aéreo no tripulado*. Tesina o Proyecto, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- HUERTA, EDUARDO; MANGIATERRA, ALDO y NOGUERA, GUSTAVO (2005). *GPS Posicionamiento Satelital*. UNR Editora.
- LE, ANH QUAN (2004). «Single-point positioning with C/A code». *Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology*.
- LEICK, ALFRED (1993). *GPS Satellite Surveying*. Wiley Interscience.
- NAVSTAR, UNITED STATES GOVERNMENT (1996). *Navstar GPS User Equipment Introduction*. United States Government.
- PETROVSKYY, VOLODYMYR y TRETAK, VYACHESLAV (2007). *Precise GPS Position and Attitude*. Tesina o Proyecto, Aalborg University.
- SCHWIEGER, VOLKER (2003). «Using Handheld GPS Receivers for Precise Positioning». *2nd FIG Regional Conference*.

SEEBER, GÜNTER (1993). *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter.

TECHNOLOGY, SiRF (2007). *SiRF Binary Protocol Reference Manual*. SiRF Technology Inc..

TIBERIUS, C. y KENSELAAR, F. (1998). «Estimation of the stochastic model for GPS code and phase observables». *Survey Review*.

XU, GUOCHANG (2003). *GPS Theory, Algorithms and Applications*. Springer.